INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Septiembre 2013 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

MATEMÁTICAS
El legado de Évariste Galois

PERCEPCIÓN
Desarrollo de la visión

CAMBIO CLIMÁTICO
Explotación de arenas petrolíferas

El amanecer de los exoplanetas

Los astrofísicos estudian sus atmósferas en busca de signos de vida extraterrestre

INFORME ESPECIAL
La educación en la era digital

EXOPLANETAS | EL LEGADO DE ÉVARISTE GALOIS | DESARROLLO DE LA VISIÓN

SEPTIEMBRE 2013 N.º 444



6,50 EUROS



ARTÍCULOS

TIM FLACH, GETTY IMAGES


6


52



88

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Durante los últimos años la investigación sobre exoplanetas ha avanzado mucho más rápido de lo que se esperaba. Los astrónomos ya conocen cientos de mundos que orbitan en torno a estrellas lejanas; un número que no cesa de crecer. Gracias al desarrollo de nuevas técnicas observacionales, los expertos intentan ahora analizar la composición química de sus atmósferas en busca de indicios de vida extraterrestre. Imagen de Don Foley.



redaccion@investigacionyciencia.es



Marzo y abril 2013

DILEMA CUÁNTICO

En «Paradojas colectivas y lógica cuántica» [Investigación y Ciencia, marzo de 2013], George Musser analiza la relación entre ciertos fenómenos cuánticos y el dilema del prisionero (en el que dos delincuentes detenidos irán a la cárcel si ambos confiesan o quedarán en libertad si ambos callan; pero si solo uno confiesa, este saldrá libre con una recompensa y el otro recibirá la máxima pena). Musser señala que una manera de resolver el dilema consistiría en emplear partículas entrelazadas durante el interrogatorio.

Sin embargo, ello requeriría que el carcelero cooperase con ellos, ya que debería efectuar una medición cuántica. Además, el comportamiento empírico de los jugadores podría explicarse, sin necesidad de recurrir a metáforas cuánticas, mediante lo que el científico cognitivo Douglas Hofstadter denomina *superracionalidad*; esto es: «Mi oponente es semejante a mí, por lo que actuará como yo».

Howard Barnum

Responde Musser: *Desde luego, no parece que en el mundo real los carceleros vayan a permitir que los presos utilicen partículas entrelazadas para comunicarse. Aquí el problema consiste en elaborar un modelo matemático de la racionalidad humana. Una cosa es suponer que los seres humanos se acomodan a una definición u otra de racionalidad; otra muy distinta, describir dicho comportamiento con precisión. Es en este sentido en el que la mecánica cuántica puede resultar útil, ya que nos brinda un valioso juego de herramientas matemáticas (sin que ello implique en absoluto que nuestros procesos mentales sean cuánticos en ningún sentido literal).*

POLVO ESPACIAL

En «Meteoritos primitivos» [Investigación y Ciencia, abril de 2013], Alan E. Rubin se pregunta por el proceso de calentamiento que, en el sistema solar primigenio, pudo haber provocado la fusión parcial del polvo para dar lugar a los cóndrulos estratificados hallados en los meteoritos. Su artículo alude a los inconvenientes que presentan algunas explicaciones, como las ondas originadas por el estallido de supernovas. ¿Podrían los grumos de polvo haberse acelerado y calentado al interaccionar con los protoplanetesimales?

Jim Bonne
Cumming, Georgia

Responde Rubin: *Los protoplanetesimales tal vez solo midieran escasos kilómetros, por lo que el polvo que se moviese a su alrededor no habría experimentado ningún calentamiento apreciable. En los años setenta se sugirió que los cóndrulos tal vez fuesen producto de la fricción experimentada por el polvo en las atmósferas de los protoplanetas. Sin embargo, una gran cantidad de cóndrulos contienen silicatos que no guardan ninguna relación con ellos (una composición mineral y una proporción de isótopos de oxígeno distintas). Estos grumos «residuales» no son cóndrulos sin fundir, sino que provienen de una generación de cóndrulos preexistentes.*

Resulta más sencillo suponer que algunos cóndrulos primitivos se fragmentasen al chocar con otros en la nebulosa solar, para después incorporarse al polvo antes de volver a sufrir otra fusión parcial. Ello requiere una fuente de energía capaz de fundir solo la parte exterior del cóndrulo, pero no el grumo residual de su interior. Por esa razón, varios investigadores se inclinan por un mecanismo de calentamiento de tipo descarga, similar a los relámpagos.

EMPATÍA Y PSICOPATÍA

En «La sabiduría de los psicópatas» [Investigación y ciencia, abril de 2013], Kevin Dutton alude a la falta de empatía como un rasgo psicopático que podría llegar a resultar beneficioso. El término *psicópata*, sin embargo, suele hacer referencia a una persona de conducta amoral y antisocial.

Los individuos analizados por Dutton se dedican a actividades prosociales, lo que supone una conducta moral. Por más que carezcan de empatía, su moralidad se rige por principios como la racionalidad, la identidad, la fidelidad al grupo o a ciertos principios, el miedo al castigo o a las consecuencias, y el interés propio a largo plazo. La carencia de empatía no convierte a nadie en un psicópata. El concepto mismo de «sabiduría del psicópata» se muestra, pues, poco apropiado.

Andrew D. Withmont

Responde Dutton: *No existe una única característica que marque la frontera entre quién es un psicópata y quién no. Como cualquier otro rasgo de la personalidad, los atributos que distinguen a un psicópata se hallan distribuidos de manera uniforme entre el conjunto de la población. Del mismo modo que no existe una divisoria oficial entre quien sabe tocar el piano y un concertista de ese instrumento, la frontera entre un psicópata «puro» y alguien que solo «psicopatiza» es difusa. Un individuo puede ser implacable, intrépido y carente por completo de empatía, pero, al mismo tiempo, no actuar con violencia, de modo antisocial ni de manera inconsciente.*

Un sujeto que puntúe alto en tres rasgos psicopáticos podrá considerarse más inmerso en el «espectro del psicópata» que otro que puntúe bajo en esos mismos tres aspectos, pero nunca cerca de la «zona de riesgo» de quien registre valores elevados en todas las características del espectro.

Si se adopta semejante perspectiva multidimensional de la psicopatía, sí puede hablarse de una «sabiduría» asociada a ciertas combinaciones de rasgos psicopáticos, en varios niveles y en contextos profesionales diversos.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

ESCARABAJO RINOCERONTE COCOTERO (*Oryctes rhinoceros*)

Hoddle lo recolectó mientras el insecto atacaba una palmera recién plantada en Sumatra. Se trata de una importante plaga de las palmeras cocoteras que aún no ha llegado a Estados Unidos, pero Hoddle está preparado: tiene su ADN, lo que permitirá una rápida identificación.





ORUGA DE LA SEMILLA DEL AGUACATE (*Stenoma catenifer*)

Las orugas de esta especie perforan los aguacates y convierten su interior en una masa blanda. En Guatemala, Perú y México, el hábitat natural de estas orugas, Hoddle y sus colaboradores obtuvieron las feromonas de los insectos, que podrían servir como un sistema de alerta temprana para advertir de su llegada a Estados Unidos. También recogieron sus enemigos naturales, que podrían utilizarse en el futuro para controlar la plaga, en caso de que llegase hasta California.

PICUDO DE LA PALMERA COCOTERA (*Rhynchophorus vulneratus*)

Esta plaga de las palmeras cocoteras (provocada por una especie semejante a la que ataca las palmeras de España, el picudo rojo, o *Rhynchophorus ferrugineus*) probablemente llegó hasta Laguna Beach, en California, desde Bali, afirma Hoddle, que ha analizado el ADN del animal. Sospecha que un viajero pudo llevar los insectos a Estados Unidos como alimento (en Indonesia se comen), intentó criarlos en su casa y los dejó escapar.



BARRENADOR DEL ROBLE CON MANCHAS DORADAS (*Agrilus auroguttatus*)

Este escarabajo nativo del sur de Arizona ha invadido California con resultados desastrosos: ha causado la muerte de hasta 80.000 robles del Parque Nacional de Cleveland, en el condado de San Diego. Hoddle cree que los excursionistas lo extendieron sin darse cuenta, al recoger leña en Arizona y llevarla a California.



ENTOMOLOGÍA

Plagas potencialmente peligrosas

A pesar de su reducido tamaño, los insectos pueden causar estragos en el ambiente o en la economía de un país. Mark Hoddle, director del Centro de Investigación de Especies Invasoras de la Universidad de California en Riverside, viaja por todo el mundo estudiando y batallando contra los insectos que devoran exportaciones de gran valor comercial o plantas de interés ecológico. Hoddle almacena muestras en su laboratorio para analizar el ADN y donarlas después a colecciones científicas. A veces también atrapa insectos antes de que ocasionen problemas en su país y los conserva para el futuro. «Resulta difícil predecir la siguiente plaga invasora», explica. «De esta forma, cuando aparece, ya la tengo marcada como objetivo.»

—*Anna Kuchment*

FOTOGRAFÍAS DE SPENCER LOWELL

PALEONTOLOGÍA

Falsos fósiles

En el paso de la vida a la fosilización, las alas de un escarabajo primitivo perdieron su color y, después, su forma. Al ser aplastadas y horneadas lentamente por la arena, las brillantes alas verdes se oscurecieron; primero se volvieron de color azul claro, después añil y finalmente negro.

La historia de la vida, muerte y fosilización de un insecto suena muy sencilla, pero la paleobióloga Maria McNamara tardó años de esfuerzos en recomponerla. Esta investigadora de la Universidad de Bristol deseaba averiguar el modo en que evolucionaron las señales de alerta, el camuflaje y los colores de cortejo de los insectos primitivos. El estudio de los fósiles ordinarios solo revela parte de la historia, ya que la mayoría de los insectos fosilizados muestran hoy una apariencia negra, quizá por haber perdido sus colores al quedar enterrados.

McNamara y su equipo decidieron trabajar a la inversa. Envejecieron artificialmente alas de escarabajos y gorgojos actuales para descubrir el efecto de la fosilización en el color.



Publicaron sus resultados en el número de febrero de la revista *Geology*.

La fosilización no constituye un proceso apacible. Para simularlo, McNamara dejó las alas de los insectos en el agua de un estanque durante 18 meses, después las calentó hasta 270 grados centígrados, una temperatura superior a la de la mayoría de los hornos domésticos, y las sometió a presiones de 500 atmósferas, para reproducir el aplastamiento y el calentamiento que convierten los residuos atrapados en el barro en fósiles pétreos. El equipo descubrió que el proceso fragmentaba y adelgazaba los caparazones reflectantes de los escarabajos, lo que hacía cambiar la longitud de onda reflejada por ellos. De este modo se transformaban del verde al azul y luego al negro.

Lo que es más importante, comprobaron que los gorgojos conservaban las estructuras de coloración conocidas como cristales fotónicos [*véase* «Trucos cromáticos de la naturaleza», por P. Ball; Investigación y Ciencia, julio de 2012], lo cual podría significar que los fósiles que carecen de ellas probablemente nunca las tuvieron. McNamara concluye que el desarrollo evolutivo de los cristales fotónicos debe de ser reciente, al menos en los gorgojos, porque había examinado gorgojos de tres millones de años de antigüedad que no los poseían.

Algunos científicos discrepan de esa idea. Andrew Parker, entomólogo del Museo de Historia Natural de Londres, señala que cada fósil sufre un proceso diferente, de modo que resulta difícil obtener principios de aplicación general a partir de una sola especie o de un solo fósil. Sin embargo, considera que la idea es muy sugerente: «Podemos empezar a reunir información para recrear escenas de la vida en color en esa época».

—Lucas Laursen

TECNOLOGÍA

Vigilar la cultura desde el cielo

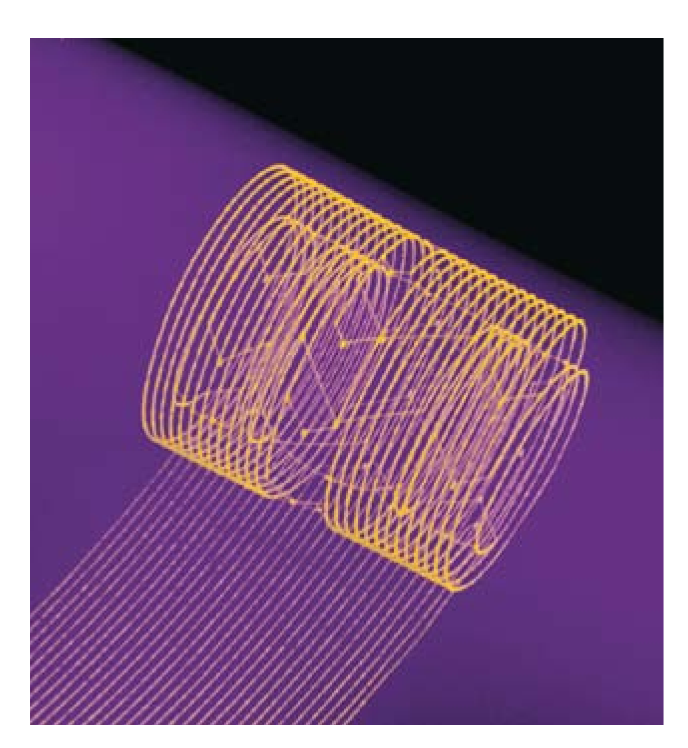
La ciudadela de Alepo (*vista aérea*) se levanta sobre esta antigua ciudad del norte de Siria y contiene los restos de palacios, mezquitas y baños que datan del siglo x d.C. El lugar, Patrimonio de la Humanidad, está hoy amenazado por la guerra civil entre los rebeldes y los soldados del presidente Bashar al-Assad.



Los conflictos armados y los desastres naturales amenazan no solo a los humanos, sino también a los lugares de interés cultural, pero evaluar los daños sobre el terreno puede resultar imposible. En lugar de ello, los expertos utilizan satélites para monitorizar y proteger museos, monumentos y otros lugares de importancia histórica que pueden hallarse en peligro. El Consejo Internacional de Museos (ICOM) colaboró con el Programa sobre Aplicaciones Operacionales de Satélite (UNOSAT), del Instituto de las Naciones Unidas para la Formación Profesional e Investigaciones, para informar sobre la región de Osetia del Sur durante la guerra entre Georgia y Rusia en 2008. UNOSAT aprovechó una red de satélites públicos y privados para obtener vistas aéreas. Con estas imágenes y las coordenadas de los lugares de interés cultural de la zona, el ICOM realizó una evaluación casa por casa en solo 24 horas. Desde entonces, este organismo ha utilizado datos de satélites para valorar los daños de antiguos mausoleos de Tombuctú durante la guerra civil de Mali de 2012 y planea evaluar la destrucción causada por el terremoto de 2010 en Haití.

Tal vez resulte imposible intervenir en regiones donde hay conflictos en curso, pero la tecnología de los satélites y el análisis de sus imágenes pueden proporcionar al ICOM información suficiente para concienciar a la comunidad internacional, realizar un llamamiento a los combatientes sobre el terreno y elaborar un plan para la rehabilitación cuando cesen los conflictos.

—Marissa Fessenden



Un nuevo tipo de circuitos tridimensionales podrían usarse para crear «materia inteligente» que reaccionase a los estímulos del entorno.

INGENIERÍA

Circuitos blandos

Integrar circuitos tridimensionales en materiales blandos, como la goma, ha sido desde hace tiempo uno de los objetivos más esquivos en ingeniería. Esa dificultad tal vez desaparezca en un futuro gracias a un nuevo tipo de circuito blando y poroso, más parecido a una red que a un chip, el cual podría entretejerse en un gran número de sustancias. Ello permitiría crear «materia inteligente» que reaccionase ante los estímulos del entorno, así como incorporarlos en tejidos biológicos para crear piel y órganos que informasen sobre el estado de salud del portador.

Jia Liu y Charles Lieber, expertos en nanotecnología de la Universidad Harvard, y sus colaboradores han creado circuitos bidimensionales con cables de silicio de unos 30 nanómetros de espesor. A pesar de la resina epoxi endurecida que reviste los nanocables, su estructura es similar a la de una red con grandes huecos, por lo que el 99 por ciento del espacio ocupado por estos circuitos planos se encuentra vacío. Su flexibilidad permite enrollarlos como pergaminos, lo cual da lugar a estructuras tridimensionales que podrían emplearse para construir circuitos mucho más avanzados. El espacio vacío puede rellenarse con todo tipo de sustancias, introduciéndolas primero en estado líquido y dejando después que se solidifiquen. Los materiales híbridos resultantes podrían llegar a constituir sistemas «muy inteligentes», asegura Liu. Los resultados de su grupo aparecieron publicados en el mes de abril en la revista *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

Insertadas en caucho de silicona, esas redes electrónicas alertarían sobre cuándo y cómo se ha deformado el material; por ejemplo, para avisar a un conductor del daño sufrido por uno de sus neumáticos antes de que sufra un reventón. Futuras versiones permitirían fabricar accesorios que monitorizasen los signos vitales, sugiere Liu, así como lentes de contacto que registrasen y mostrasen datos. «Creemos que nuestra técnica brinda numerosas oportunidades para integrar sistemas electrónicos en todos los aspectos de la vida», sostiene el investigador. Yat Li, químico de materiales de la Universidad de California en Santa Cruz que no participó en el proyecto, parece estar de acuerdo: «Se trata de una investigación puntera, que lleva los sensores electrónicos a un nuevo nivel de complejidad y funcionalidad», asegura.

Las redes podrían combinarse con geles que contengan células vivas. Los «tejidos cibernéticos» resultantes se utilizarían como repuestos para órganos dañados, los cuales proporcionarían información sobre su estado o incluso mejorarían las capacidades humanas. Una piel sintética, por ejemplo, incorporaría sensores extra. También podrían fabricarse huesos y músculos más fuertes. «Los tejidos cíborg constituirán la aplicación más importante de esta investigación», concluye Liu.

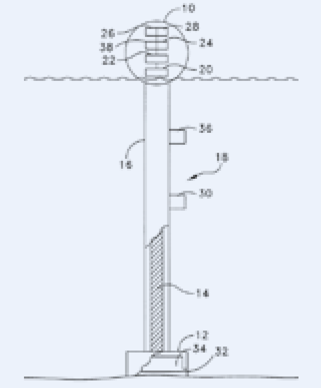
—Charles Q. Choi

PATENTES

Aprovechamiento de la energía submarina con cables piezoeléctricos: Las boyas no solo sirven para señalar los lugares peligrosos para la navegación. También registran las condiciones marítimas y eólicas, asisten a los meteorólogos, graban los cantos de ballenas y permiten al ejército detectar vehículos submarinos. Aunque la mayoría de las boyas emplean baterías, los ingenieros llevan largo tiempo intentando aprovechar la energía de las corrientes marinas para mantenerlas activas. Estas, sin embargo, no suelen activar una turbina con la rapidez suficiente para producir electricidad sin interrupciones.

Según Derke R. Hughes, ingeniero jefe del Centro Naval para la Guerra Submarina de la Marina estadounidense, la solución pasa por construir las boyas con un material que genere electricidad. Los materiales piezoeléctricos pertenecen a esa clase. Poseen una estructura cristalina con polos positivos y negativos; cuando se los somete a presión, un número suficiente de ellos se alinea, se crea un voltaje y se produce un flujo de cargas.

La licencia número 8.274.167 de la Oficina de Patentes estadounidense describe una boya que genera su propia energía. Su parte flotante se halla conectada a un largo cable anclado en el fondo marino o amarrado a un peso. El núcleo del cable está compuesto de titanato zirconato de plomo, un material piezoeléctrico sintetizado en el Instituto de Tecnología de Tokio. Cuando las corrientes marinas fluyen alrededor, se crean microrremolinos que lo hacen vibrar «como una cuerda de guitarra», explica Hughes. La potencia generada depende de la longitud y la tensión del cable, pero en principio podría bastar para alimentar una batería de sónares.



¿Generaría una central compuesta por boyas los megavatios necesarios para suministrar electricidad a tierra firme? «Cabe imaginar un gran número de boyas que funcionen en serie. Sería cuestión de hacerlo bien», afirma Hughes. Por el momento la idea funciona sobre el papel, pero aún debe construirse el primer prototipo.

—Marissa Fessenden

CORTESÍA DE JIA LIU Y CHARLES LIEBER, UNIVERSIDAD HARVARD (*circuito 3D*); CRÉDITO: OFICINA DE PATENTES Y MARCAS REGISTRADAS DE EE.UU. (*boya*)

ASTROFÍSICA

Exoplanetas más cerca de casa

La misión Kepler, de la NASA, ha descubierto miles de posibles mundos en torno a estrellas lejanas. Más de cien de esos candidatos a exoplanetas ya han sido confirmados como tales y algunos de ellos se cuentan entre los planetas conocidos con un tamaño más parecido al de la Tierra. De los 25 exoplanetas descubiertos hasta ahora con diámetro menor que el de nuestro planeta, todos menos uno han sido hallados por Kepler. Los resultados de la misión solo adolecen de un pequeño problema: los nuevos planetas se hallan a cientos o incluso miles de años luz de distancia, demasiado lejos para investigarlos con detalle.

Para remediarlo, la NASA ha dado luz verde al Satélite para el Sondeo de Tránsitos de Exoplanetas (TESS). Con un coste de unos 200 millones, será lanzado en 2017 y explorará una porción del cielo mucho mayor que su predecesor, gracias a lo cual espera descubrir exoplanetas más cercanos. «En total, examinaremos en torno a medio millón de estrellas», explica George R. Ricker, astrofísico del Instituto de Tecnología de Massachusetts e investigador principal del proyecto. Miles de esas estrellas se encuentran a menos de cien años luz del sistema solar.

Al igual que el telescopio Kepler y el europeo CoRoT, el satélite TESS buscará tránsitos planetarios; es decir, las breves atenuaciones en la luz de una estrella que, cuando se suceden a intervalos regulares, delatan que un exoplaneta orbita a su alrededor. Ricker estima que el nuevo instrumento podría descubrir entre 500 y 700 planetas de tamaño similar al de la Tierra o solo algunas veces mayor, algunos de los cuales bien podrían ser habitables.

Para cuando el satélite TESS concluya su misión, de unos dos años, tal vez los astrónomos ya dispongan de un nuevo y potente instrumento para examinar los nuevos planetas: el telescopio espacial James Webb. Con un lanzamiento previsto para 2018, este podría identificar indicios de vida en un planeta cercano mediante un análisis químico de su atmósfera. En principio, la detección de ciertas moléculas permitiría deducir la existencia de vida extraterrestre. Los expertos ya han simulado la capacidad del telescopio James Webb para analizar la atmósfera de un planeta habitable cercano: «Casi podemos percibir indicios biogénicos, aunque no del todo», señala Ricker. «Para eso tal vez haga falta un nuevo instrumento».

En todo caso, si el satélite TESS logra descubrir cientos de planetas cercanos, los astrónomos tendrán mucho trabajo en los próximos años: averiguar cómo son, qué tipo de hábitats podrían albergar y, quizá, considerar la idea de enviar una sonda hacia alguno especialmente atractivo.

—John Matson



Recreación artística del futuro satélite buscador de exoplanetas TESS, proyectado por la NASA.

CORTESÍA DEL INSTITUTO KAVLI DE ASTROFÍSICA E INVESTIGACIÓN ESPACIAL, INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE MASSACHUSETTS; EXPOSICIÓN ITINERANTE «MIRADAS A LA MUJER IBÉRICA» (Dama de Baza y Dama de Elche)

AGENDA

CONFERENCIAS

5 de septiembre
El lenguaje de la ciencia
Margarita Salas
Instituto Cervantes
Madrid
Ciclo de conferencias del cincuentenario de la SEBBM
www.sebbm.es/ES/50-aniversario_16

EXPOSICIONES

Del 9 al 29 de septiembre
La esfera del agua
Vilaseca
www.agua2013.es

Hasta el 15 de septiembre
Miradas a la mujer ibérica
Museo de Arqueología de Cataluña
Ullastret
www.miradasalamujeriberica.es





OTROS

Del 1 al 6 de septiembre
11.ª conferencia internacional sobre paleoceanografía
Sitges
www.icp2013.cat

Del 9 al 12 de septiembre
Congreso internacional sobre investigación en didáctica de las ciencias
Gerona
www.congresoenseciencias.com

Del 16 al 20 de septiembre
Conferencia europea sobre sistemas complejos
Barcelona
www.eccs13.eu

Del 23 al 28 de septiembre
Niels Bohr y la vieja teoría cuántica
Centro de Ciencias de Benasque Pedro Pascual
Benasque
benasque.org

Del 30 de septiembre al 1 de octubre
Conferencia ICREA sobre el origen de la multicelularidad
Barcelona
www.multicellularity2013.com

COMUNICACIÓN

La enseñanza de la ciencia de los nóbel

Crónica de una cita en Lindau

Antiguamente, los congresos científicos eran actividades con mayor impacto que los de ahora. Los expertos en un tema se reunían, presentaban resultados novedosos, discutían estos avances y, a menudo, sugerían nuevos caminos por los que iría la ciencia. Algunos ejemplos de este tipo de encuentros fueron el de los químicos en Karlsruhe en 1860 (en el que se cambió el curso de la química); el Congreso Anatómico de Berlín en 1889, en el que Ramón y Cajal presentó su teoría de la neurona; o el Congreso de Matemáticos de París en 1900, donde Hilbert presentó una panorámica general de la situación de las matemáticas de aquel momento y su evolución futura.

En la actualidad, los congresos son bastante menos apasionantes y románticos. Aunque se invita a científicos destacados para que impartan conferencias, estos suelen limitarse a contar resultados ya publicados, por lo que, para los especialistas en el tema, no hay apenas novedades.

El encuentro de nóbeles que se celebra cada año en la bella y tranquila ciudad alemana de Lindau es, en ese sentido, una reunión especial. Congrega a centenares de jóvenes científicos y decenas de galardonados con el premio Nobel. A principios de julio tuvo lugar la 63.ª edición del mismo, en la que participaron 35 premios nóbel y alrededor de 625 jóvenes investigadores de unos 80 países, entre ellos 23 representantes de España, siendo el quinto país con más participantes (tras Alemania, Estados Unidos, China e India). Dado que los participantes son seleccionados mediante criterios exigentes, este dato demuestra la calidad de los jóvenes científicos españoles.

Las reuniones de Lindau suelen centrarse en un área científica en particular. Este año le llegó el turno a la química. Se contó con la participación de 24 galardonados con el Nobel de química. También asistieron 6 premios de física, 4 de fisiología y medicina, y uno de la paz (que participó en la mesa redonda de la clausura).

El programa fue muy intenso: conferencias plenarias de los galardonados —con asistencia de todos, incluidos los medios de comunicación, colectivo en el que participé en calidad de bloguero, invitado por *Investigación y Ciencia* y *Nature*—, discusiones de los galardonados solo con los jóvenes investigadores, clases magistrales (con número reducido de asistentes, por inscripción), mesas redondas (para todos los asistentes) y desayunos científicos sobre algunos de los temas generales debatidos en el encuentro, especialmente relacionados con la producción, el almacenamiento de la energía y sus implicaciones ambientales (la asistencia era por invitación).

Asimismo, tuvimos la posibilidad de charlar directamente con algunos de los premiados. Ello me permitió entrevistar a Richard Schrock y Robert Grubbs (compartieron el premio Nobel de química en 2005 por sus investigaciones sobre la reacción de metátesis de olefinas) y a Walter Kohn (galardonado en 1998 por el desarrollo de métodos computacionales cuánticos para el estudio de sustancias químicas). Las conversaciones con los tres fueron muy gratificantes. Hablamos de sus trabajos pasados y presentes, así como de aspectos generales sobre la investigación científica (la presión por publicar muchos artículos y el futuro de los jóvenes). Con Grubbs y Schrock discutimos sobre la importancia que la química verde y los métodos catalíticos tienen en la reducción del impacto ambiental de la industria química. Con Kohn, sobre las

KATHLEEN RAVEN (*mesa redonda*); BEATRICE LUGGER (*S. Haroche con estudiantes*)





MESA REDONDA (*izquierda*) **sobre la conversión y el almacenamiento de la energía química, conducida por los laureados con el Nobel de química Gerhardt Ertl (2007), Robert H. Grubbs (2005), Walter Kohn (1998), Hartmut Michel (1988) y Richard Schrock (2005). Los estudiantes aprovechan una de las pausas del encuentro (*derecha*) para charlar con el nóbel de física Serge Haroche (2012).**

energías renovables y la repercusión de su trabajo —como físico teórico— en los químicos.

Todas las conferencias fueron de alto nivel. Allí se presentaron algunos de los resultados científicos más importantes de las ultimas décadas. Y algunos de los galardonados fueron más allá: sus ponencias llevaron a la reflexión científica, así como humana y filosófica. En este aspecto, cabe resaltar las conferencias de Jean-Marie Lehn (sobre la evolución de la química), Steve Chu (sobre el uso de la energía en el futuro), Richard Ernst (que recomendó dedicarse a actividades paralelas a la ciencia, con el fin de enriquecer la carrera del científico), Aaron Ciachonover (que abordó un problema tan amplio como la posible curación de todas las enfermedades, ofreciendo una visión histórica, muy general y perspectivas de futuro de esta área multidisciplinar), Ada Yonath (que demostró que se puede ser mujer, científica y tener una vida familiar normal) y Harold Kroto (que ofreció una panorámica general de la situación de la ciencia, sus fortalezas y debilidades, y la importancia de la cultura científica).

También merece la pena destacar una de las mesas redondas, donde se debatió, con participación activa de la audiencia, sobre la necesidad de comunicar la ciencia a la sociedad. En esta participaron los laureados Kroto, Brian Kobilka y Yonath y los blogueros Beatrice Lugger y Simon Engelke, con Adam Smith como moderador.

En suma, una gran reunión científica, por lo que allí se expuso y por la excelente interacción entre los jóvenes investigadores y los premios nóbel.

—Bernardo Herradón
Instituto de Química Orgánica General
CSIC
Madrid

MEDIOAMBIENTE

El futuro del ciclo del nitrógeno

La enorme repercusión de las actividades humanas en el ciclo del nitrógeno obliga a reconsiderar las pautas de consumo de recursos terrestres en los países desarrollados

A pesar de que casi el 80 por ciento de la atmósfera terrestre se compone de dinitrógeno (gas nitrógeno, N_2), la mayoría de los organismos vivos no pueden asimilar esta forma del elemento y deben convertirlo en otras que sí puedan utilizar, como el amoníaco. Durante mucho tiempo los humanos han aprovechado la capacidad de los cultivos de leguminosas para fijar este gas en compuestos reactivos de nitrógeno asimilables y mejorar así la fertilidad de los suelos. Sin embargo, hoy la cantidad de nitrógeno reactivo producido de este modo se ha visto superado en gran medida por el de origen industrial. Junto con los óxidos de nitrógeno, otro compuesto reactivo que se forma como subproducto de procesos de combustión, el nitrógeno liberado en el ambiente por las actividades humanas está dando lugar a una serie de consecuencias imprevistas. En un trabajo publicado en *Nature* el pasado febrero, X. Liu y sus colaboradores han cuantificado la envergadura de la alteración del ciclo del nitrógeno en China provocada por actividades como la producción de alimentos, el transporte y el consumo de energía.

En una investigación de gran relevancia, Liu ha demostrado que la mayor liberación de óxidos de nitrógeno (NO_x) y amoníaco (NH_3) a la atmósfera se correlaciona con un aumento en la deposición de nitrógeno reactivo atmosférico (N_r) hallado en las precipitaciones. Su estudio se basa en más de 300 conjuntos de datos publicados relativos a la deposición de N_r en China a lo largo de un período de 30 años (de 1980 a 2010). Y lo que es más importante, los autores han demostrado que esas alteraciones han hecho variar la absorción de nitrógeno por las plantas y su concentración en las hojas.

Si bien el objetivo principal de la investigación ha consistido en cuantificar los cambios biogeoquímicos y biológicos, los resultados pueden considerarse también indicadores de una alteración multidimensional del ciclo del nitrógeno. Varios fenómenos contribuyen a dicha modificación: la formación de partículas finas en el aire que contienen nitrógeno, nocivas para la salud humana; la influencia de los compuestos NO_x en la formación de ozono en el suelo, que causa pérdidas en las cosechas; el aumento de emisiones de óxido nitroso (N_2O), un gas de efecto invernadero; y, finalmente, los niveles extremos de contaminación de aguas por nitratos y otras formas de N_r. La contaminación de las aguas suscitó especial preocupación durante los Juegos Olímpicos de Pekín de 2008, cuando una «marea verde» de algas interrumpió los entrenamientos para las competiciones de vela.

Según el estudio, la deposición de N_r atmosférico en China ha aumentado un 60 por ciento desde 1980. No obstante, los resultados obtenidos se basan en la cantidad de N_r capturado en recolectores de aguas pluviales y, tal y como señalan los autores, sin duda la deposición total resulta superior. Ello se debe a que los dispositivos capturan la mayor parte de las lluvias pero tan solo una parte de las precipitaciones de nieve. También recogen gases, partículas finas y niebla que contienen N_r, aunque en una cantidad muy inferior a la depositada sobre la cubierta vegetal. Por lo tanto, cabe esperar que la deposición anual total de N_r en los ecosistemas chinos alcance con frecuencia más de 80 kilogramos de nitrógeno por hectárea, una cifra varias veces superior a la obtenida con los recolectores de aguas pluviales.

Con el fin de evaluar el efecto de la mayor deposición de nitrógeno sobre la vegetación, los investigadores utilizaron datos de ensayos de fertilización de cultivos, que suelen incluir medidas de referencia sobre la producción de parcelas no abonadas. Tras combinar los datos obtenidos en distintos puntos de China, los autores han calculado un aumento del 15 por ciento en la absorción de nitrógeno por las plantas desde 1980. En principio, la introducción de N_r derivado de las emisiones de NO_x podría haber mejorado la productividad de los cultivos. Sin embargo, no han observado un crecimiento neto en ellos, lo cual mantiene abierta la pregunta sobre si el efecto fertilizante derivado de una mayor deposición de N_r compensa la reducción del crecimiento

como consecuencia del ozono del suelo originado a partir de los NO_x. En el caso de ecosistemas naturales, el aporte adicional de nutrientes continúa representando una notable amenaza para la diversidad biológica.

Las tasas de fertilización con nitrógeno en China se sitúan entre las más elevadas del planeta. Este hecho que se ha visto favorecido por las subvenciones que concede el país a la producción de abonos, una medida establecida para hacer frente a cuestiones de seguridad alimentaria. Sin embargo, la dependencia de los fertilizantes ha limitado el reciclaje del nitrógeno del estiércol y de las aguas residuales, lo que ha reducido la eficiencia del uso de nitrógeno en su totalidad. El consumo de abonos en China puede compararse con las tasas regionales y mundiales de fertilización total (con abonos que contienen compuestos de nitrógeno, fósforo y potasio) estimadas por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). En la década de los sesenta, el mayor empleo de fertilizantes tenía lugar en los países desarrollados (75 kilogramos por hectárea). En 2006, Asia Oriental (incluida China) se había puesto a la cabeza con un valor medio de unos 200 kilogramos por hectárea, cifra que a menudo se multiplicaba por cinco en algunos lugares. Liu apunta que, desde 1980, a ese problema se ha añadido un número de cabezas de ganado 3,2 veces superior y una cantidad de vehículos 20,8 veces mayor, lo que acentúa la contaminación por N_r en China.

Pero el nitrógeno no solo despierta inquietud en ese país. Los cálculos de la FAO prevén un aumento del 50 por ciento en el consumo mundial de abonos hacia 2050, como consecuencia del crecimiento de la población, la mejora de las dietas y un mayor consumo de productos de origen animal. Al mismo tiempo, los pronósticos que hacen énfasis en el crecimiento demográfico y económico estiman hacia 2050 un aumento global del 70 por ciento de la liberación de nitrógeno al ambiente. Para entonces, se prevé que el consumo medio de abonos en Latinoamérica y en el sur de Asia se aproximará a los niveles de China y que también se producirán incrementos notables en el norte de África y Oriente Próximo.

En líneas generales, los aumentos regionales en las pérdidas de N_r son equiparables y los pronósticos apuntan a un empeoramiento de los efectos de la contaminación por nitrógeno, con un aumento de las emisiones de NO_x en Asia, a no ser que se tomen medidas al respecto. De hecho, tales predicciones tal vez resulten benévolas. Si se extrapolan las tendencias actuales indicadas por Liu, hacia 2050 podríamos observar en China un aumento del 85 por ciento en NH_3 y del 200 al 240 por ciento en las emisiones de NO_x.

Los datos arriba mencionados subrayan la urgencia de una acción global para hacer frente a las crecientes concentraciones de nitrógeno. Con todo, tal y como se refleja en un informe reciente, no existe una convención internacional que defina los objetivos para una gestión más adecuada de los ciclos globales del nitrógeno y otros nutrientes. Los autores de dicho informe (entre ellos los autores del presente artículo) han propuesto un objetivo compartido al que aspirar para mejorar en un 20 por ciento la eficiencia en el uso del nitrógeno hacia 2020; un cálculo de costes y beneficios indica que ello podría suponer un ahorro neto de unos 170.000 millones de dólares. Conseguirlo requeriría cambios en las prácticas industriales y agrarias, así como una reevaluación de las pautas de consumo de la sociedad occidental. Pero la obtención de tales objetivos exige que las naciones se organicen y se comience a plantear seriamente la cuestión del nitrógeno.

—Mark A. Sutton
Centro de Ecología e Hidrología (CEH) del Consejo de Investigación del Medio Natural (NERC)
Estación de Investigación de Edimburgo
—Albert Bleeker
Centro de Investigación de Energía de los Países Bajos (ECN)
Ambos también pertenecen a la Iniciativa Internacional del Nitrógeno, auspiciada por el CEH y el ECN.

Artículo original publicado en *Nature* 494, págs. 435-436, 2013.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2013

EMPLEO DE ABONOS y liberación de nitrógeno al ambiente. En las distintas regiones del planeta se ha producido un aumento acentuado del consumo global de abonos (que contienen nitrógeno, fósforo y potasio) en las últimas décadas, ascenso que continuará en el futuro debido al crecimiento de la población, la mejora de las dietas y el mayor consumo de productos de origen animal (*a*). Paralelamente a este aumento, se prevén pérdidas hacia el ambiente de óxidos de nitrógeno (NO_x) en emisiones procedentes de combustiones y de nitrógeno reactivo (N_r) procedente de actividades agrarias (*b*).

FUENTES: «WORLD AGRICULTURE TOWARDS 2030/2050: THE 2012 REVISION» POR N. ALEXANDRATOS Y J. BRUINSMA, FAO, 2012 (*a*); «CHANGES IN ECOSYSTEM GOODS AND SERVICES AND THEIR DRIVERS ACROSS THE SCENARIOS» POR J. ALCAMO, ET AL. EN *ECOSYSTEMS AND HUMAN WELL-BEING*, VOL. 2, COORDINADO POR S. R. CARPENTER, ET AL., PÁGS. 297-373, ISLAND PRESS, 2005 (NO_X EN 2050); «N_2O EMISSIONS FROM THE GLOBAL AGRICULTURAL NITROGEN CYCLE – CURRENT STATE AND FUTURE SCENARIOS» POR B. L. BODIRSKY, ET AL. EN *BIOGEOSCIENCES* 9, PÁGS. 4169-4197, 2012 (N_R)

QUÍMICA

Diez cuestiones clave sobre el hielo y la nieve

La comprensión del comportamiento molecular del agua congelada resulta fundamental para pronosticar el futuro de nuestro planeta

El hielo constituye un elemento esencial para el clima, la geología y la vida. Comprender su comportamiento resulta básico para poder predecir el futuro de nuestro planeta y esclarecer el origen de la vida. Cubre planetas, lunas y cometas en nuestro sistema solar. En la Tierra, las capas de hielo polar blanco reflejan hasta el 90 por ciento de la radiación procedente del Sol. Una media del 7 por ciento de la superficie oceánica se encuentra congelada; el hielo marino altera las corrientes oceánicas y restringe el intercambio de gases con el agua. El hielo y la nieve recubren de forma permanente el 10 por ciento de la superficie continental y llegan a tapizar la mitad del hemisferio norte a mediados del invierno. Dichas capas de agua congelada aíslan el suelo y los océanos.

En las nubes de hielo se concentran las sustancias transportadas por el aire y tienen lugar procesos químicos atmosféricos. En el interior de las nubes de granos de hielo situadas por encima de los polos se producen reacciones que agotan el ozono. En consecuencia, se forman agujeros en la capa estratosférica de ozono a latitudes elevadas que exponen a millones de personas a una mayor cantidad de radiación ultravioleta. Las reacciones químicas que tienen lugar en la nieve superficial pueden producir ozono y otros contaminantes ambientales. En la nieve se acumulan toxinas orgánicas y mercurio, que, tras la fusión de esta, se vierten en ríos y océanos, incorporándose a la cadena trófica.

Sin embargo, los mecanismos moleculares que subyacen bajo tales procesos continúan suponiendo, en gran parte, una incógnita. La falta de mayores conocimientos sobre el modo en que se producen las reacciones químicas en el hielo y la nieve, y en qué regiones del grano y la estructura cristalina tienen lugar imposibilita la construcción de módulos de nieve o nubes de hielo para la elaboración de modelos atmosféricos y climáticos o la extrapolación de los estudios de laboratorio a condiciones reales.

Si queremos abordar los graves problemas ambientales a los que nos enfrentamos, debemos ahondar en la química y la física del hielo a escala molecular. Los últimos avances en materia de simulación computacional y técnicas experimentales como la espectroscopía de análisis de superficies (que en la actualidad puede emplearse en condiciones de temperatura y presión relevantes para el hielo ambiental) abren las puertas a estudios futuros prometedores. El presente artículo resume diez preguntas abiertas relacionadas con el hielo.

¿Cómo se forma el hielo?

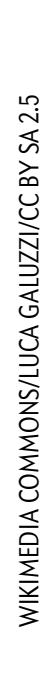
A pesar de su importancia para entender el clima terrestre y el ciclo hidrológico, todavía desconocemos numerosos aspectos acerca de cómo y cuándo se congela el agua. No podemos predecir con certeza el momento y el lugar donde se formarán nubes de hielo en la atmósfera; ciertas zonas del cielo permanecen húmedas cuando esperaríamos que se congelaran. ¿Comienzan a congelarse las gotas de agua desde la superficie o desde su interior? ¿Qué morfología adoptará el hielo que formen?

Con frecuencia, el hielo se forma con facilidad sobre superficies sólidas. Para comprender las razones de este fenómeno, debemos investigar los principios moleculares de la interacción del agua con las superficies.

¿Cómo cambia la estructura del hielo?

Los cristales de hielo se componen de moléculas de agua dispuestas según una configuración tetraédrica regular unida por puentes de hidrógeno. Se conocen un gran número de estructuras de agua; entre ellas, la más familiar es el hielo hexagonal, que origina los copos de nieve. A medida que varía la temperatura y la presión, las moléculas de agua adaptan

IMPRESIONANTE FRENTE del glaciar Perito Moreno en el sudoeste argentino, parte del inmenso campo de hielo sudamericano.



su estructura para minimizar la energía; en consecuencia, se generan diferentes fases de hielo.

A escala macroscópica comprendemos bien dichas transiciones de fase. El siguiente paso consiste en reproducir los procesos moleculares de tales transiciones en simulaciones computacionales o cálculos de química teórica dentro del rango total de temperaturas y presiones. A partir de los modelos optimizados podríamos abordar otras cuestiones como la estructura superficial y la manera en que reaccionan las impurezas en el hielo.

¿Cómo se comportan las diferentes estructuras de hielo?

Además de cristales ordenados, el hielo también aparece en variedades amorfas y metaestables (estructuras moleculares de larga duración pero que no se encuentran en un estado de mínima energía). Esta variabilidad estructural amplía el espectro de posibilidades para explicar con qué facilidad cristaliza el hielo, la reactividad química de las nubes de hielo, cómo capturan impurezas los cometas y la fuerza mecánica de los cuerpos de hielo en el espacio. Sin embargo, sabemos poco acerca de la estructura del hielo en dichos cuerpos, de su posible mezcla con hielo cristalino y de su lugar de formación.

El hielo amorfo (de estructura molecular ligeramente tetraédrica pero sin ser cristalino completamente) podría formarse en cometas cuando el agua se condensa a temperaturas extremadamente bajas. El hielo cúbico metaestable, con el que es más fácil hacer crecer una semilla que en su forma hexagonal, puede formarse en nubes de hielo. El análisis de tales fases entraña complejidad, puesto que son de difícil acceso e indistinguibles ópticamente. En el laboratorio, los estudios de rayos X y de difracción de neutrones podrían dar con la respuesta.

¿Cómo es la estructura superficial del hielo?

El orden molecular se interrumpe en las superficies cristalinas. Los puentes de hidrógeno expuestos al aire también se enlazan con contaminantes como el metanol, la acetona, el ácido nítrico y el clorhídrico. Las redes de moléculas de agua resultantes son irregulares y difíciles de describir, sobre todo en hielo templado próximo al punto de fusión, donde el desorden se propaga hacia el interior del cristal.

Debemos dilucidar los aspectos fundamentales relacionados con esa capa, como su estructura molecular y la variación de la misma con la temperatura. Tampoco conocemos con exactitud el papel que desempeña la capa superficial en la inclusión de impurezas y en las reacciones químicas. Con ayuda de la espectroscopía de superficies, que permite analizar la red de enlaces de las moléculas de agua a presión casi ambiente y, por tanto, del hielo próximo a su punto de fusión, podrían hallarse las respuestas a estas cuestiones.

¿Dónde se alojan las impurezas en el interior del hielo?

En la atmósfera superior y en el espacio, el hielo de agua se mezcla frecuentemente con monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, ácido sulfúrico y ácido nítrico. El hielo de la superficie terrestre contiene sustancias procedentes de fuentes como la sal marina, el polvo y la contaminación. En los cometas que se aproximan hacia el Sol se ha observado que se evaporan simultáneamente

diferentes impurezas, lo cual indica que se encuentran atrapadas en el material congelado hasta que la matriz de hielo se vaporiza. Sin embargo, desconocemos cómo se mezclan dichas impurezas con el hielo o si los diferentes tipos de hielo, como la nieve blanda o los glaciares compactos, contienen contaminantes de modos semejantes.

En los laboratorios se han identificado estructuras cristalinas comunes asociadas con impurezas. Por ejemplo, el ácido nítrico forma hidratos sólidos con agua congelada que desempeñan un papel fundamental en el agotamiento del ozono de la estratosfera terrestre. Se precisa identificar la fase, la ubicación y el ambiente químico de las impurezas en el interior de las matrices de hielo tanto en el espacio como en las nubes y la tierra. En este aspecto, la espectroscopía de análisis de superficies y la difracción representan técnicas prometedoras.

¿Cómo se producen las reacciones en el hielo?

En el polo Sur, las reacciones de óxidos nitrosos liberados por la nieve producen suficiente ozono para elevar la concentración local hasta niveles similares a los observados en áreas industriales. En el Ártico, los iones de mercurio atmosférico que se depositan en la cubierta de nieve se transforman químicamente antes de ser liberados de nuevo al aire. En el espacio, las moléculas como el hidrógeno, el agua, el metanol, los óxidos de carbono, el amoníaco y los aminoácidos se forman en las superficies de los granos de hielo.

Para conocer en detalle las reacciones químicas que tienen lugar tanto en láminas superficiales como en matrices de hielo complejas es preciso identificar las vías principales y la ubicación de las impurezas que participan en los procesos, puesto que la reactividad en la superficie del hielo difiere considerablemente de la reactividad en microbolsas o en grandes masas de hielo. Mediante experimentos cinéticos clásicos podrían identificarse los estados químicos de los reactivos.

¿Hay bolsas de líquido en el interior del hielo?

Los poros y canales del hielo marino se rellenan de salmuera. La sal marina en el interior de la nieve y las impurezas a lo largo del límite entre los granos de hielo glaciar pueden causar fusión local y dar lugar a bolsas de líquido internas. La presencia de líquido altera el destino de las impurezas y la estabilidad de fase del hielo, pero desconocemos todavía qué cantidad de líquido queda atrapada en el hielo ambiental y en qué lugares del mismo.

En el laboratorio, los líquidos contenidos en diminutas bolsas de hielo nanométricas se congelan a unas decenas de grados kelvin por debajo de lo normal. Sin embargo, se desconoce si tales bolsas existen en la naturaleza y qué cantidad de impurezas pueden albergar en su interior. Las observaciones se tornan difíciles a escalas tan pequeñas y no es fácil diferenciar ópticamente agua líquida de agua sólida. Tales cuestiones podrían abordarse mediante análisis microscópicos con ayuda de sustancias que realcen el contraste entre la fase sólida y la líquida.

¿Cómo influyen los procesos físicos en las impurezas del hielo?

Las sustancias atmosféricas son absorbidas rápidamente por la nieve y se adentran poco a poco en el interior del hielo glaciar, a lo largo de los siglos. Ambos procesos alteran la química del aire, la nieve y el hielo. Las variaciones en las concentraciones de contaminantes que difunden lentamente, como los fluoruros y metanosulfonatos, dificultan la datación del registro ambiental obtenido a partir de testigos de hielo.

Para determinar los procesos que gobiernan tanto la distribución de las impurezas en el hielo y la nieve como el intercambio de las mismas con la atmósfera en las nubes y en la superficie, debe calcularse a qué velocidad y en qué lugar de la estructura cristalina se produce dicho intercambio. La adsorción superficial, la difusión en el interior de los cristales de hielo o a lo largo de los límites entre granos y la captura por parte de líquidos influyen en la migración y el paradero de las impurezas. Para analizar en detalle tales interacciones a nivel molecular podrían aplicarse técnicas espectroscópicas.

¿Cómo influye el crecimiento del hielo en las impurezas?

Las moléculas de agua en las capas superficiales del hielo y la nieve se evaporan y se vuelven a congelar continuamente. En un día, conforme las temperaturas fluctúan, pueden redistribuirse hasta el 60 por ciento de las moléculas.

¿Cómo responden las impurezas ante unos cambios tan drásticos en la forma, el área superficial y el volumen del hielo? Los estudios de laboratorio y de campo revelan que el mercurio, el peróxido de

hidrógeno, el ácido clorhídrico y el ácido nítrico son absorbidos con mayor facilidad por el hielo en crecimiento que por el hielo estable. Se requieren estudios experimentales para describir con precisión el proceso de absorción en un determinado rango de velocidades de crecimiento. Un buen punto de partida sería el estudio de la absorción en cristales individuales en crecimiento.

¿Cuánto durará el hielo?

Los datos de satélite indican que la cubierta perenne de hielo oceánico en el Ártico mengua aproximadamente un 10 por ciento cada década. El retroceso de los glaciares en los casquetes de Groenlandia y la Antártida se está acelerando. Nuestra comprensión de los datos recogidos no basta para predecir la velocidad a la que la nieve y el hielo podrían desaparecer de nuestro planeta en el presente siglo. El estudio de las consecuencias de la química del hielo en los procesos de fusión a escala molecular nos permitirá pronosticar el futuro del hielo y la nieve de la Tierra.

En el laboratorio

¿Cómo podemos contestar a esas preguntas? Algunas colaboraciones científicas actuales constituyen buenos puntos de partida, como el programa de Interacciones Químicas Aire-Hielo del Proyecto Internacional de Química Atmosférica Global, del que formo parte, la red Micro-DICE de la Fundación Científica Europea sobre la microdinámica del hielo, y el proyecto ArcRisk sobre riesgos sanitarios árticos, apoyado por la Comunidad Europea.

Tales colaboraciones entre expertos de diferentes disciplinas y países deberían ampliarse. Necesitamos incorporar científicos de materiales que trabajen con estructuras superficiales y cristalinas en metales, biólogos celulares que estudien la biota de ambientes congelados y expertos en alimentos que analicen cómo se alteran los compuestos durante la congelación.

Debería aumentar la financiación de experimentos fundamentales de laboratorio. Considero que podríamos hallar la respuesta a las diez preguntas anteriores mediante una inversión de 5 millones de euros. Desafortunadamente, será difícil que ocurra, pero ahora que hemos identificado diez cuestiones clave, ha llegado el momento de plantear experimentos complejos y bien definidos, basados en refinadas técnicas analíticas, entre ellas el sincrotrón. La falta de reconocimiento de la importancia de la química del hielo puede ser una de las razones por las que muchos de los grupos de investigación de hielo y nieve han optado por realizar trabajos de campo. Necesitamos dar un giro a esta tendencia y utilizar los conocimientos obtenidos en las últimas décadas para entender la función del hielo en el sistema terrestre global, antes de que desaparezca.

—Thorsten Bartels-Rausch
Laboratorio de radioquímica y química ambiental
Instituto Paul Scherrer
Villigen, Suiza

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 494, págs. 27-29, 2013. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2013

SUPERCONDUCTIVIDAD

El interferómetro térmico

El desorden se vuelve coherente

El calor suele asociarse a un proceso en el que la transmisión de energía tiene lugar de forma desordenada. Hace casi 50 años, sin embargo, los físicos estadounidenses Kazumi Maki y Allan Griffin predijeron que, a través de la unión entre dos electrodos superconductores, una fracción de la corriente térmica se transmitiría de forma coherente. Ello implicaría que las corrientes de calor podrían interferir del mismo modo en que lo hacen las corrientes eléctricas en un superconductor o los haces de luz emitidos por un láser. A pesar de estas sorprendentes consecuencias, las predicciones de Maki y Griffin han pasado casi inadvertidas hasta hace poco.

En un experimento efectuado hace unos meses en el laboratorio de nanotecnología NEST, en Pisa, hemos logrado construir un interferómetro térmico y demostrar su funcionamiento a bajas temperaturas. El hallazgo no solo nos ha permitido comprobar las extrañas propiedades que pueden llegar a exhibir las corrientes térmicas en un material superconductor, sino que promete todo un abanico de aplicaciones técnicas. Nuestros resultados fueron publicados en diciembre de 2012 en la revista *Nature*.

Dicho fenómeno se manifiesta en una fracción de la corriente térmica que atraviesa una unión de Josephson. Con este nombre se conoce a la junta entre dos electrodos superconductores separados por una pequeña barrera, de manera que la corriente entre uno y otro se transmite por efecto túnel. En tales condiciones, la corriente de calor se comporta de modo análogo a como lo haría una corriente eléctrica que fluyese a través del mismo tipo de unión. Dicha analogía confiere a la corriente térmica dos propiedades sorprendentes. En primer lugar, y contra toda intuición, esta es capaz de transportar el calor desde un foco frío a uno caliente. Por otro lado, esa fracción de calor se transmite de modo coherente.

Electrones coordinados

Para entender el funcionamiento de un interferómetro térmico conviene recordar el comportamiento de las ondas de luz. Cuando en un punto se encuentran dos haces de luz coherente, como los emitidos por un láser, se producen fenómenos de interferencia. Esta será constructiva si ambos haces coinciden en una cresta o en un valle (decimos entonces que se encuentran en fase), o destructiva si una cresta se superpone a un valle (en cuyo caso se hallarán oposición de fase). La interferencia constructiva da lugar a zonas de luz más intensa, mientras que la destructiva produce regiones oscuras. Para que se generen tales patrones de interferencia, resulta fundamental que exista una relación de coherencia entre las fases.

Con los materiales superconductores sucede algo parecido. Los electrones que transportan la carga eléctrica en un superconductor se encuentran agrupados en parejas. Estos tándems, denominados pares de Cooper, pueden caracterizarse por una única fase macroscópica; es decir, son coherentes. Esta propiedad cuántica permite observar fenómenos

de interferencia en la corriente eléctrica análogos a los que experimentan los haces de luz láser.

Para ello se emplean los dispositivos superconductores de interferencia cuántica (SQUID, por sus siglas en inglés), los cuales constan de un anillo superconductor interrumpido por dos uniones de Josephson conectadas en paralelo. La aplicación de un campo magnético a través de dicho anillo permite controlar la fase macroscópica del condensado de pares de Cooper y observar los fenómenos de interferencia en la corriente eléctrica [*véase* «Superconductores de interferencia cuántica», por John Clarke; Investigación y Ciencia, octubre de 1994].

Los SQUID revisten gran importancia desde un punto de vista técnico. Por un lado, se trata de los sensores de campo magnético más sensibles que existen en la actualidad, lo que les permite detectar campos magnéticos muy débiles, incluso aquellos producidos por el cerebro humano. Además, sirven como dispositivo amplificador de señales y son considerados como candidatos prometedores para constituir el corazón de la computación cuántica.

Nuestro interferómetro térmico resulta muy similar a un SQUID tradicional. Se trata también de un dispositivo anular, formado por dos electrodos superconductores conectados débilmente mediante uniones de Josephson. La diferencia reside en el modo de polarizar el dispositivo. Mientras que un SQUID eléctrico se polariza en corriente o en voltaje, nuestro análogo térmico debe polarizarse en temperatura. A tal fin, empleamos una resistencia para calentar uno de los dos electrodos superconductores hasta una temperatura aproximada de 700 milikelvin, mientras que la otra mitad se mantiene a unos 230 milikelvin.

Del foco frío al caliente

Al aplicar un campo magnético a través del anillo podemos controlar la fase macroscópica del condensado superconductor y producir así la interferencia térmica. Esta se traduce en la observación de máximos y mínimos en la temperatura electrónica de uno de los electrodos, los cuales dependen a su vez de forma periódica del campo magnético aplicado. Nuestros datos demuestran, además, que la fracción anómala de la corriente de calor se transmite del electrodo frío al caliente.

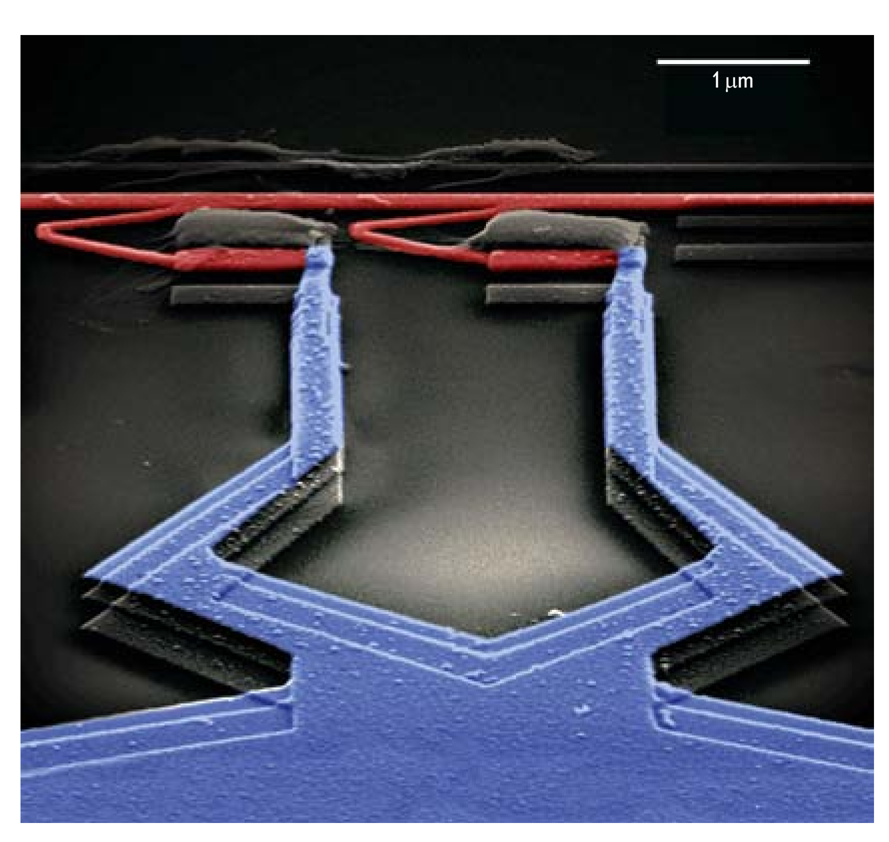
Cabe señalar que dicha propiedad no supone una violación del segundo principio de la termodinámica, ya que a la fracción anómala de la corriente térmica debemos sumar la componente ordinaria, transportada en este caso por las cuasipartículas (electrones desapareados) que conviven en equilibrio térmico con los pares de Cooper. Como no podía ser de otra manera, la suma de ambas se transmite del electrodo caliente al frío.

Pero no solo el flujo térmico contradice nuestra intuición. Nos queda entender cómo el calor, que suele asociarse al desorden, puede propagarse de forma coherente. Para complicar aún más las cosas, el condensado de pares de Cooper no transporta entropía; es decir, no transmite calor.

La clave reside en los procesos de transporte térmico que involucran cuasipartículas y pares de Cooper en la unión de Josephson. Como residuo de esa danza, las cuasipartículas se apoderan en parte de las propiedades cuánticas que caracterizan al condensado de pares de Cooper. Las consecuencias resultan notables: el desorden se vuelve coherente. Además, el flujo térmico depende de la fase macroscópica del condensado superconductor, lo cual permite controlar las corrientes térmicas de un modo impensable hasta ahora.

Del mismo modo que las propiedades cuánticas del transporte de carga eléctrica se han venido explotando desde hace años para fabricar componentes de circuitería cuántica, las sorprendentes propiedades de las corrientes de calor aquí descritas podrían aprovecharse en el futuro para concebir dispositivos térmicos análogos a transistores, diodos o interruptores. Ello abriría las puertas a la posibilidad de construir circuitos térmicos coherentes, los cuales podrían resultar de enorme utilidad para diversas aplicaciones, como bolómetros, sensores de radiación o arquitecturas en computación cuántica. En definitiva, el calor podría emplearse como una nueva forma de transmitir información, manipularla mediante puertas lógicas y almacenarla en memorias térmicas.

—María José Martínez
Laboratorio NEST
Consejo Nacional de Investigación de Italia
Escuela Normal Superior, Pisa



CIRCUITO TÉRMICO: Micrografía en colores falsos realizada con un microscopio electrónico de barrido. Dos superconductores a distinta temperatura (*rojo y azul*) han sido conectados mediante uniones de Josephson (*juntas*). La corriente térmica que se transmite a través de dichas uniones lo hace de forma coherente, u «ordenada». Esta sorprendente propiedad del calor podría emplearse en el futuro para construir dispositivos de circuitería térmica.

CORTESÍA DE LA AUTORA

ASTRONOMÍA

El amanecer de los exoplanetas

Nuestra galaxia rebosa de mundos. Los científicos se han lanzado a



estudiar sus atmósferas en busca de signos de vida extraterrestre

Michael D. Lemonick

Michael D. Lemonick escribe para el portal de noticias sin ánimo de lucro *Climate Central*. Es el autor de *Mirror Earth: The search for our planet's twin* (Walker Books, 2012). Ha trabajado durante 21 años como redactor científico para la revista *Time*.



Ninguno de los que se encontraban allí ese día, del astrofísico más experimentado al periodista científico más novato, olvidará fácilmente la conferencia de prensa que la Sociedad Astronómica Americana celebró en San Antonio en enero de 1996.

Fue allí donde Geoffrey W. Marcy, por entonces investigador en la Universidad de San Francisco, anunció que él y su compañero R. Paul Butler, de la Universidad de California en Berkeley, habían hallado dos nuevos planetas: el segundo y el tercero que se descubrían en torno a una estrella similar al Sol. El primero de esos mundos, 51 Pegasi b, había sido notificado unos meses antes por Michel Mayor y Didier Queloz, de la Universidad de Ginebra. Pero, siendo una observación aislada, siempre cabía la posibilidad de que se tratase de una fluctuación estadística o incluso de un error. Ahora, sin embargo, Marcy podía afirmar con seguridad que ese no era el caso: «Los planetas no escasean tanto, al fin y al cabo», manifestó a la concurrencia.

El anuncio estremeció el mundo de la astronomía. Hasta entonces casi nadie había buscado planetas porque se pensaba que resultarían demasiado difíciles de detectar. Pero aquellos tres mundos habían aparecido tras indagar en un grupo reducido de estrellas, lo que sugería que tal vez pudieran descubrirse muchísimos más.

Si Butler y Marcy se hubiesen limitado a resolver una cuestión académica sobre la teoría de formación de planetas, su hallazgo no habría concitado tanto revuelo. Sin embargo, aquel descubrimiento mostró de manera inequívoca que los planetas extrasolares realmente existían. Por vez primera, se abría la posibilidad de responder una pregunta que ha inquietado a filósofos, científicos y teólogos desde tiempos de la antigua Grecia: ¿estamos solos en el universo?

Tras la euforia inicial, los científicos se detuvieron a considerar qué métodos permitirían investigar la presencia de vida en un planeta ajeno al sistema solar. Si se descartaba la detección de una señal de radio extraterrestre al estilo de Jodie Foster en la película *Contact*, el único método razonable consistía en buscar huellas biológicas en la atmósfera de esos mundos: indicios de moléculas muy reactivas que, como el oxígeno, desaparecerían muy rápido si no existiese un metabolismo que las sintetizase.

En su trabajo, Marcy, Mayor y sus colaboradores habían medido el empuje gravitatorio que aquellos planetas ejercían sobre su estrella anfitriona. Ese efecto indirecto delataba su existencia. Pero para detectar indicios biológicos había que captar una imagen de la exosfera del planeta. Con ese objetivo en mente, la NASA programó el lanzamiento de una serie de telescopios espaciales cada vez más avanzados, la cual debería culminar con la puesta en órbita del Interferómetro Detector de Planetas Terrestres, un proyecto de miles de millones de dólares que se materializaría en algún momento entre 2020 y 2030. Así las cosas, los astrónomos se convencieron de que, si querían aprender algo sobre las atmósferas de exoplanetas, aún tendrían que esperar un tiempo.

Pero se equivocaron. El descubrimiento de aquellos primeros exoplanetas animó a toda una generación de jóvenes científicos a volcarse en la que de repente se convirtió en la especialidad astrofísica de moda. A su vez, estos atrajeron a numerosos colegas más veteranos. Aquella repentina afluencia de poderío intelectual condujo a nuevas ideas para investigar las atmósferas de exoplanetas, lo que aceleró sobremanera el proceso. En 2001 se confirmó la presencia de sodio en la atmósfera de un planeta lejano. Desde entonces se han observado indicios de metano,

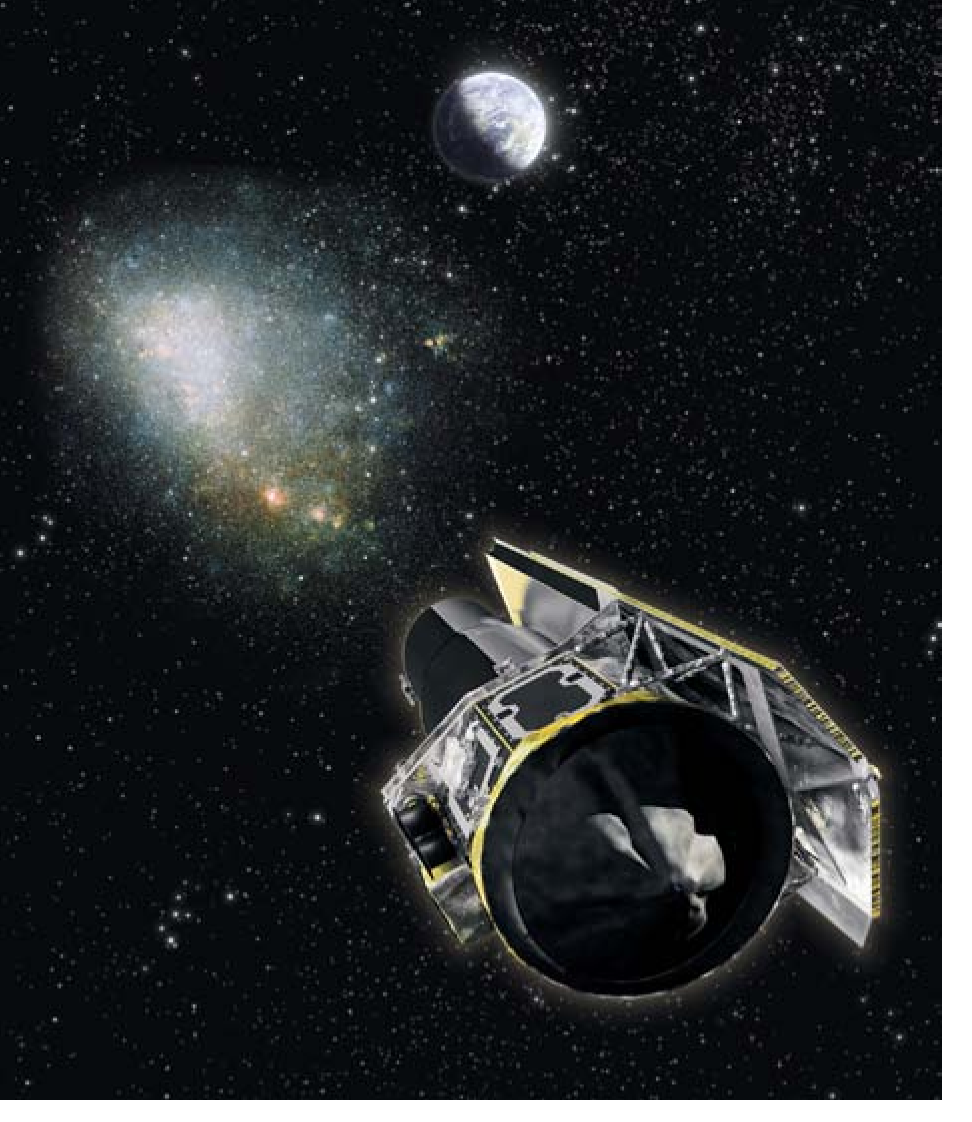
EN SÍNTESIS

Hasta hace poco los astrofísicos pensaban que sería casi imposible estudiar la atmósfera de un exoplaneta distante. Sin embargo, la investigación ha avanzado mucho más deprisa de lo esperado.

El cambio de brillo que se produce cuando un exoplaneta se oculta tras su estrella anfitriona ha permitido a los científicos obtener varias pistas sobre la composición de su atmósfera.

Hoy ya existen varias técnicas avanzadas para analizar las atmósferas de exoplanetas lejanos. Dentro de poco tal vez resulte posible detectar moléculas delatoras de la existencia de vida.

PÁGINAS ANTERIORES: CORTESÍA DEL OBSERVATORIO EUROPEO AUSTRAL



ECLIPSES LEJANOS: El telescopio espacial Spitzer puede detectar el sutil cambio de brillo que se produce cuando un planeta se esconde tras su estrella madre.

CORTESÍA DEL CALTECH Y LA NASA

dióxido de carbono, monóxido de carbono y agua. El examen de las atmósferas de otros mundos ha llegado a proporcionar pistas indirectas de que algunos de ellos podrían estar compuestos parcialmente por diamante. «Hasta ahora hemos aprendido algo sobre la atmósfera de entre 30 y 50 planetas, teniendo en cuenta algunos hallazgos aún sin publicar», explica Heather Knutson, astrofísica del Instituto de Tecnología de California que ha participado en varias observaciones pioneras.

Tales descubrimientos se encuentran aún muy lejos de proporcionar pruebas sobre la existencia de vida. Ello no sorprende, ya que la mayoría de los mundos de los que habla Knutson son planetas semejantes a Júpiter y muy calientes, ya que orbitan en torno a su estrella a menos distancia que la que media entre Mercurio y el Sol. Cada vez más, sin embargo, Knutson y otros astrónomos han comenzado a investigar las atmósferas de planetas menores: las llamadas supertierras, cuya masa oscila entre 2 y 10 veces la de nuestro planeta. Hace tan solo una década nadie habría imaginado algo así.

Una indicación más de que los mundos potencialmente habitables abundan llegó el pasado mes de abril, cuando el telescopio espacial Kepler anunció el hallazgo de dos planetas con un radio inferior a dos veces el terrestre. Además, se situaba a una distancia de su estrella anfitriona en la que la temperatura tal vez resultase compatible con la existencia de vida. Aunque estos planetas, bautizados como Kepler 62e y 62f, se encuentran demasiado lejos para estudiarlos con detalle, los astrónomos se muestran convencidos de que la primera oportunidad para buscar huellas biológicas en un planeta similar al nuestro no se retrasará muchos años más.

EL PLANETA DEL APARCAMIENTO

Los investigadores pensaron que pasarían décadas antes de poder estudiar las atmósferas de mundos lejanos debido a que los primeros exoplanetas habían sido identificados por medios indirectos; en concreto, a partir del influjo gravitatorio que ejercían sobre su estrella anfitriona. Los planetas en sí no se observaban. Sin embargo, dado que un planeta y su estrella siempre orbitan en torno al centro de masas común, la estrella parece experimentar un ligero temblor. Debido al efecto Doppler, cuando esta avanza hacia nosotros su luz se desplaza sutilmente hacia el extremo azul del espectro; cuando se aleja, dicho desplazamiento tiene lugar hacia el rojo. La magnitud del efecto depende de la velocidad radial del astro; es decir, de la rapidez con la que se acerca o aleja de la Tierra. Esa velocidad permite deducir la masa del exoplaneta que orbita a su alrededor.

Pero existe otro método para detectar planetas. Si se da la circunstancia de que el plano de la órbita del objeto se encuentra alineado con la línea de visión desde la Tierra, el exoplaneta pasará en ciertos momentos justo por delante de su estrella. Cuando eso sucede, decimos que tiene lugar un tránsito. Durante la época de los primeros descubrimientos casi nadie pensó en observar tránsitos, pero solo porque la búsqueda de otros mundos se hallaba en una fase demasiado temprana. (Una notable excepción fue William J. Borucki, del Centro de Investigación Ames de la NASA, cuyo telescopio espacial Kepler acabaría detectando años más tarde miles de tránsitos).

En 1999, Timothy W. Brown, por entonces en el Centro Nacional de Investigación Atmosférica de EE.UU., y David Charbonneau, en esa época estudiante de posgrado en Harvard, instalaron un pequeño telescopio en un aparcamiento de Boulder, en Colorado. Con tales medios, avistaron el primer tránsito de un exoplaneta. Se trataba de HD 209458b, el cual había sido detectado con anterioridad mediante la técnica de la velocidad radial. Semanas después, Gregory W. Henry, de la Universidad de Tennessee, en colaboración con Marcy, observó el mismo planeta transitando frente a su estrella. Al final, a ambos equipos se les concedió el mérito del descubrimiento, pues los resultados se publicaron de forma simultánea.

La detección de tránsitos no solo proporcionaba un segundo método para buscar exoplanetas, sino también una manera de medir su densidad. La técnica de la velocidad radial había revelado la masa de HD 209458b. Ahora, los astrónomos podían deducir su tamaño, ya que la cantidad de luz estelar que bloquea un planeta resulta proporcional a sus dimensiones. (Al tomar en consideración ambas magnitudes, se descubrió que HD 209458b era un 38 por ciento mayor que Júpiter, pero que solo poseía el 71 por ciento de su masa. Un resultado inesperado que el astro-

físico Adam Burrows, de la Universidad de Princeton, califica como «un problema aún pendiente de explicar».)

Por aquel entonces, algunos astrofísicos se percataron de que los tránsitos brindaban la posibilidad de estudiar la atmósfera de un exoplaneta; «un atajo maravillosamente astuto», en palabras de Knutson. Antes de que se diese a conocer el primer tránsito, Sara Seager, astrofísica del Instituto de Tecnología de Massachusetts y por entonces colega de Charbonneau en Harvard, había escrito un artículo con su director de tesis, Dimitar D. Sasselov, en el que predecían qué debería verse cuando la luz de una estrella atravesase la atmósfera de un planeta en tránsito.

Los físicos saben desde hace tiempo que cada átomo o especie molecular solo puede absorber luz de determinadas longitudes de onda. Por tanto, la atmósfera de un planeta bloqueará las longitudes de onda asociadas a los compuestos químicos que posee. De esta manera, si se observa el planeta en una de esas longitudes de onda, su fina envoltura gaseosa se tornará opaca y el planeta parecerá ligeramente mayor.

Seager y Sasselov sugirieron que el sodio resultaría especialmente fácil de detectar. «El sodio viene a ser como el olor de una mofeta: una pequeña cantidad persiste durante largo tiempo», explica Charbonneau. Este investigador cuenta con buenas razones para asegurarlo. En 2001, junto con Brown y otros colaboradores, volvieron a estudiar los tránsitos de HD 209458b. Esta vez no emplearon un pequeño telescopio en un aparcamiento, sino el telescopio espacial Hubble. En efecto, allí estaba el sodio.

ECLIPSES LEJANOS

Existe una segunda manera de inspeccionar la atmósfera de un exoplaneta, complementaria a la primera. Cuando un planeta pasa por delante de su estrella, presenta al observador su lado nocturno. En otras ocasiones, muestra al menos parte de su lado diurno. Y, justo antes de que se oculte tras la estrella, el lado diurno se halla enfrentado a la Tierra. Aunque la estrella brilla mucho más que el planeta, este también emite su propia luz, la mayor parte de ella en el infrarrojo.

Cuando el planeta se esconde, ese resplandor se desvanece; es decir, su contribución a la luz combinada del planeta y la estrella desaparece de repente. Si se comparan las imágenes antes y después de que el planeta se oculte, puede deducirse cómo debería brillar el planeta en solitario. «Eso cambia la naturaleza del problema. En vez de tener que detectar una señal muy débil cerca de otra muy intensa, todo lo que hay que hacer es medir señales que cambian con el tiempo», señala Knutson. En 2001, L. Drake Deming, por entonces en el Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA, apuntó un telescopio infrarrojo del observatorio Mauna Kea, en Hawái, hacia HD 209458b. Con ello pretendía observar esos eclipses secundarios; sin embargo, no logró distinguir nada.

Deming se hallaba casi convencido de que el telescopio espacial Spitzer, cuyo lanzamiento estaba previsto para 2003, sí podría realizar dicha observación. Charbonneau pensó lo mismo. Ambos astrofísicos, que por entonces no se conocían, solicitaron tiempo de observación en el instrumento. Deming recuerda que a principios de 2005 encontró en su buzón de voz el siguiente mensaje: «Drake, soy Dave Charbonneau, de Harvard. Me han dicho que hace poco has hecho algunas observaciones interesantes. Tal vez deberíamos hablar».

Al final resultó que Deming (en colaboración con Seager) y Charbonneau habían efectuado las primeras detecciones de eclipses secundarios de la historia casi a la vez y con el mismo telescopio. Cada grupo anunció de modo simultáneo sus resultados sobre sendos planetas en dos sistemas estelares: el muy estudiado HD 209458b, en el caso de Deming, y un planeta llamado TrES-1, en el de Charbonneau.

Un año después, el equipo de Deming observó el eclipse secundario de otro exoplaneta, HD 189733b. En un artículo de revisión de 2010, Seager y Deming escribieron: «Aquello desató una avalancha de detecciones de eclipses secundarios con Spitzer. [...] Es acertado decir que nadie había anticipado la magnitud ni el sorprendente impacto del telescopio espacial Spitzer como herramienta para avanzar en el campo de estudios atmosféricos de exoplanetas». Al respecto, Seager señala: «Estamos usando el Hubble y el Spitzer de un modo que nadie había concebido cuando se diseñaron y llegando a medir cifras decimales que nadie proyectó que fueran a alcanzarse».

CAPAS ATMOSFÉRICAS

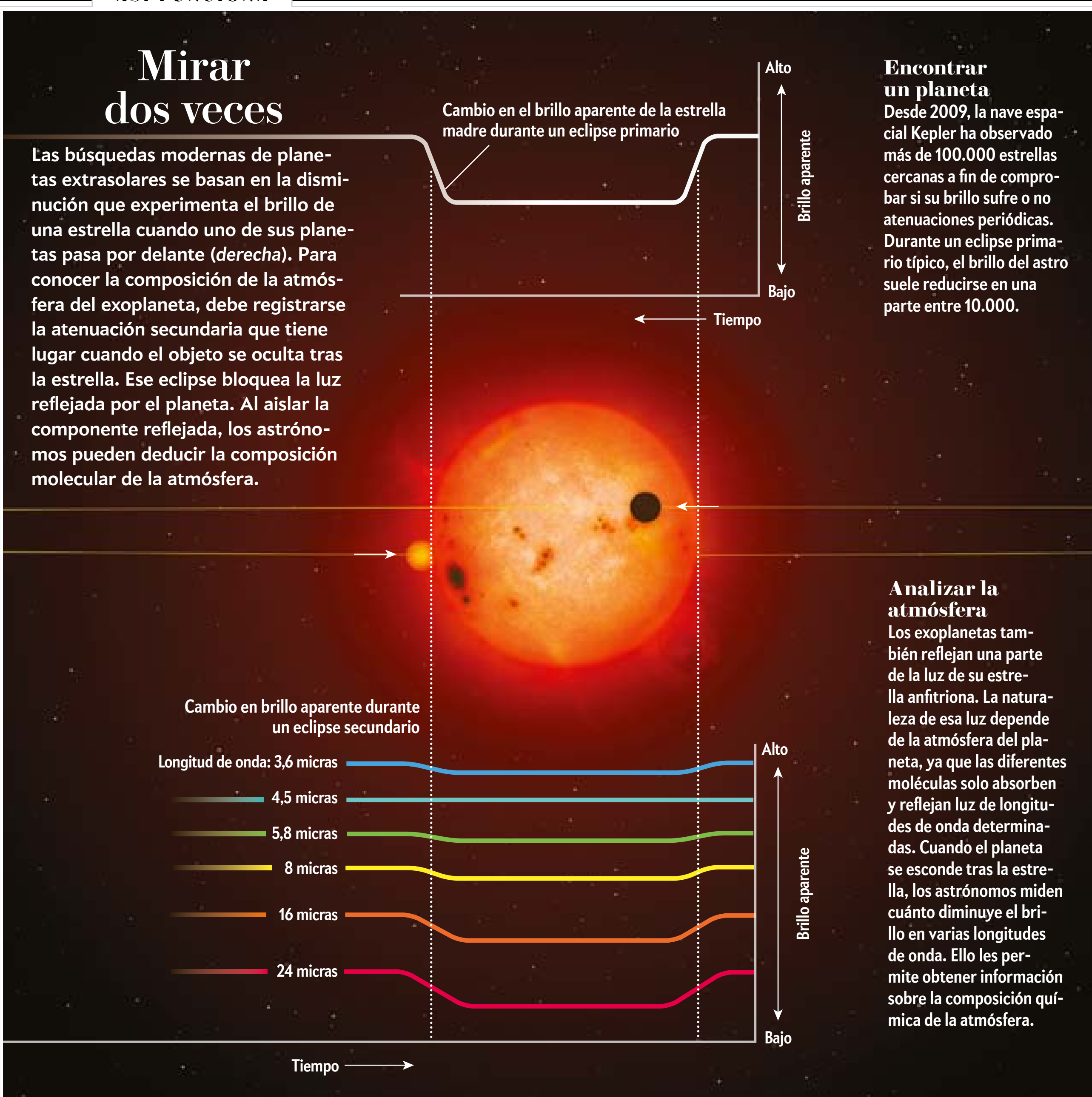
Según Seager, esos estudios han mostrado dos cosas: «Tal vez parezca una trivialidad, pero hemos aprendido que los jupíteres calientes están muy calientes», explica la investigadora. Tras medir su brillo y su temperatura, los astrónomos han constatado que resultan compatibles con los mecanismos teóricos que dan cuenta de la manera en que una estrella calienta sus planetas. «En segundo lugar, hemos detectado moléculas; ahora bien, ¿son muy diferentes de lo que esperábamos? No realmente», indica. Seager recuerda que no resulta difícil modelizar una bola de gas formada por cierta combinación de elementos a determinada temperatura y preguntarse por la clase de moléculas que se forman. «Las leyes de la física y la química son universales», sentencia.

A pesar de sus similitudes genéricas, las atmósferas de exoplanetas distintos exhiben ciertas diferencias. Una de ellas tiene que ver con la manera en que cambia la temperatura como función de la altitud. Algunos planetas, como Júpiter y Saturno, muestran inversiones de temperatura; es decir, la temperatura atmosférica aumenta con la altitud. Pero en otros no sucede así. «El problema radica en que ignoramos qué provoca esa inversión, por lo que no podemos predecir si un exoplaneta presentará dicha característica o no», explica Knutson. Algunos astrofísicos sugieren que los exoplanetas con inversiones de temperatura tal vez contengan algún compuesto que retiene el calor, como óxido de titanio, pero de momento esta explicación no pasa de ser una hipótesis.

Otra cuestión concierne a la mezcla de compuestos presentes en cada atmósfera. Nikku Madhusudhan, ahora en Yale, analizó la huella visible e infrarroja de un planeta llamado WASP-12b y dedujo que su atmósfera era inusualmente rica en carbono, con casi la misma cantidad de este elemento que de oxígeno.

La teoría sugiere que una proporción entre carbono y oxígeno superior a 0,8, si se repite en otros planetas menores del mismo sistema (lo que no resulta difícil, ya que se piensa que todos los planetas de un sistema estelar se forman a partir del mismo disco de gas y polvo), implicaría la existencia de «rocas» de carburos, minerales ricos en carbono, en lugar de las rocas de silicatos características de nuestro sistema solar. De ser el caso, un planeta del tamaño de la Tierra en el sistema de WASP-12b podría tener continentes enteros compuestos de diamante.

Seager y otros autores han escrito varios artículos teóricos en los que sugieren que no hay razón para descartar planetas formados principalmente por carbono o incluso por hierro. En el caso de WASP-12b, sin embargo, puede que esto no sea correcto. Knutson explica que Ian Crossfield, del Instituto Max



FUENTE: NASA/JPL-CALTECH/K. STEVENSON, UNIVERSIDAD DE FLORIDA CENTRAL (*datos del brillo en un eclipse secundario*); MARK A. GARLICK (*ilustración*)

Planck de Astronomía en Heidelberg, ha descubierto en fecha reciente que la luz procedente de WASP-12b está contaminada por la radiación de un sistema estelar doble situado justo detrás. «Sus datos parecen arrojar dudas sobre la manera de interpretar qué ocurre en ese planeta concreto», observa la investigadora.

MUNDOS DE AGUA

Con diferencia, el planeta que más interés ha suscitado hasta ahora ha sido GJ 1214b. Este orbita en torno a una enana roja de tipo M situada a unos 40 años luz de la Tierra. Su cercanía permite estudiarlo con relativa facilidad, mientras que su tamaño, con solo 2,7 veces el diámetro terrestre, lo convierte en un planeta mucho más similar a la Tierra que los jupíteres calientes descubiertos durante los primeros años. «Es la supertierra favorita de todo el mundo», asegura Laura Kreidberg, una estudiante de posgrado de la Universidad de Chicago que dirige el análisis de datos de uno de los proyectos de observación.

El planeta GJ 1214b fue descubierto en 2009 en el curso del proyecto MEarth, organizado por Charbonneau para buscar planetas alrededor de estrellas enanas de tipo M. Su idea se basaba en que los tránsitos de planetas pequeños resultarían más fáciles de detectar en ese tipo de estrellas, tenues y de tamaño reducido, que en otras más similares al Sol por varias razones. En primer lugar, un planeta del tamaño de la Tierra bloquearía un porcentaje mayor de la luz procedente de su estrella. Dicho planeta también ejercería un efecto gravitatorio más intenso sobre la estrella, lo que facilitaría el cálculo de su masa y, con ello, el de su densidad. Además, la zona habitable de una enana roja (la región en que la temperatura permitiría la existencia de

Nuestro poblado cosmos

Desde 2011 los astrónomos vienen descubriendo un promedio de tres exoplanetas por semana. Algunos de ellos se encuentran en la «zona habitable» de su estrella, donde la temperatura permite la existencia de agua líquida. Este gráfico representa nuestro vecindario cósmico, con 861 planetas conocidos y su distancia al Sol. Si bien parecen muchos, hasta ahora los investigadores solo han identificado una fracción minúscula de nuestros mundos vecinos. Se estima que la Vía Láctea alberga más de 100.000 millones de planetas.

• Estrellas anfitrionas
Planeta en zona habitable
Descubrimientos del telescopio Kepler

Exoplanetas confirmados en abril de 2013 (estrella, planeta y órbita no se representan a escala)

Gigantes gaseosos: planetas similares a Saturno, Júpiter y mayores (640)

Neptunianos: planetas gaseosos menores, semejantes a Neptuno (136)

Supertierras: entre 2 y 10 veces la masa de la Tierra; pueden ser rocosos o gaseosos (69)

Terrestres: planetas rocosos del tamaño de la Tierra, Marte o Venus (16)

10.000 al

1000 al

10 años luz (al)

Sol

Planetas cuya distancia al Sol se desconoce

FUENTE: DATOS DEL ARCHIVO DE EXOPLANETAS DE LA NASA, *exoplanetarchive.ipac.caltech.edu*; JAN WILLEM TULP (*gráfico*)

agua líquida) se encontraría más cerca del astro. Ello haría que fuese más fácil observar los tránsitos de un planeta situado en la zona habitable, ya que, al estar más próximos a la estrella, el alineamiento de la órbita con la línea de visión desde la Tierra no tendría que ser tan impecable como en otros casos. Por último, en la Vía Láctea hay muchas más enanas de tipo M que estrellas similares al Sol. En un radio de unos 30 años luz desde la Tierra, por ejemplo, hay unos 250 astros del primer tipo frente a solo 20 del segundo.

En todo caso, GJ 1214b dista mucho de ser un gemelo de nuestro planeta. Posee un diámetro y una masa 2,7 y 6,5 veces mayores, respectivamente, lo que resulta en una densidad total a caballo entre la de nuestro planeta y la de Neptuno. Por desgracia, tal y como señalaron Charbonneau y otros investigadores poco después de su descubrimiento, la densidad de GJ 1214b admite varias explicaciones. El objeto podría poseer un pequeño núcleo rocoso rodeado por una enorme atmósfera de hidrógeno, pero también un núcleo mayor cubierto por un océano profundo de agua y una fina atmósfera rica en agua. Sin otro dato que la densidad, resulta imposible distinguir entre ambas posibilidades. Desde luego, la idea de un mundo acuático se presenta mucho más atractiva, ya que el agua líquida se considera un requisito —si no una garantía— para la vida tal y como la conocemos.

Cuando Jacob Bean, astrónomo de la Universidad de Chicago, observó el planeta en varias longitudes de onda con la esperanza de detectar un cambio en su tamaño aparente —lo que revelaría el espesor de su atmósfera—, no halló nada. Ante esa alternativa caben dos opciones. Por un lado, el planeta podría tener una atmósfera de hidrógeno, pero llena de bruma y nubes, lo que dificultaría su detección. Por otro, tal vez se trate de una atmósfera acuosa, pero demasiado delgada para identificarla desde la Tierra. Kreidberg, que comenzó a colaborar con Bean el año pasado, pone como ejemplo una cadena montañosa: «Puede haber picos, pero si nos encontramos demasiado lejos parecerán una línea plana».

Para resolver la cuestión, al grupo de Bean le han sido concedidas 60 órbitas del telescopio Hubble para sus observaciones, las cuales han comenzado ya. No se trata de la primera vez que el Hubble apunta a GJ 1214b, pero esta campaña será la más exhaustiva de todas. Su equipo se beneficiará además de la nueva Cámara de Gran Angular 3, instalada durante la misión final de mantenimiento en mayo de 2009. Con suerte, aclararán si GJ 1214b es o no un mundo acuático.

A LA CAZA DE OXÍGENO

Desde hace algún tiempo han comenzado a detectarse numerosos planetas con períodos orbitales prolongados. Ello implica que se encuentran mucho más lejos de sus estrellas anfitrionas y que, por tanto, poseen una temperatura menor que los jupíteres calientes de los primeros años. «Durante años hemos tenido que conformarnos con objetos que se encontraban a 1500 o 2000 grados Kelvin», señala Knutson. En tales condiciones, la mayor parte del carbono atmosférico se combina con oxígeno para formar monóxido de carbono. «Lo realmente interesante de una temperatura inferior a 1000 grados Kelvin es que, por debajo de ese valor, el carbono comienza a formar metano», explica la investigadora.

El metano despierta especial fascinación, ya que puede constituir un signo de actividad biológica. No obstante, su presencia puede también deberse a procesos puramente geofísicos. Un indicio de vida mucho menos inequívoco lo proporcionaría el

Los astrónomos creen que la primera oportunidad para buscar huellas biológicas en un planeta similar al nuestro no se retrasará muchos años más

oxígeno y, en particular, el ozono, una molécula compuesta por tres átomos de oxígeno y extremadamente reactiva. Sin embargo, este compuesto presenta una huella espectral muy sutil, por lo que resultaría muy difícil de detectar; sobre todo, en el caso de una atmósfera relativamente poco espesa de un planeta similar a la Tierra.

A pesar de toda la actividad que están generando las supertierras, los astrónomos esperan aún el gran premio. «En realidad, todo esto no deja de ser un ejercicio. Reviste interés por sí mismo, pero para gente como nosotros solo se trata de un trampolín», confiesa Seager. La astrónoma explica que el gran momento llegará cuando dejen de estudiar supertierras y comiencen a analizar la atmósfera de planetas como el nuestro.

No parece fácil que eso vaya a ocurrir antes de que la NASA ponga en órbita el telescopio espacial James Webb (en principio, en 2018) y de que una nueva generación de enormes instrumentos terrestres, como el Telescopio Gigante Magallanes y el Telescopio de los Treinta Metros, comience a operar hacia 2020. Incluso con esos potentes observatorios, todavía se necesitarán cientos y cientos de horas de observación, explica Seager. Y, aun así, tampoco está claro que resulte posible identificar de modo inequívoco huellas de vida en otros planetas. Puede que para ello los investigadores deban esperar al Buscador de Planetas Terrestres, cuya financiación se ha reducido de manera tan drástica que, hoy por hoy, los augurios sobre su lanzamiento no pasan de meras conjeturas.

En cualquier caso resulta extraordinario que, mucho antes de lo que nadie había imaginado allá por los años noventa, Seager esté hablando sobre perspectivas realistas de observar indicios biológicos en otros mundos. Ya no estamos esperando a que una civilización alienígena nos encuentre y envíe un mensaje hacia nuestro planeta. Estamos explorando el aire que se alza sobre otros mundos con la esperanza de observar en sus cielos signos de un hogar.

PARA SABER MÁS

Exoplanetas habitables. Dimitar D. Sasselov y Diana Valencia en *Investigación y Ciencia*, n.º 409, págs. 16-23, octubre de 2010.

Exoplanet atmospheres. Sara Seager y Drake Deming en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 48, págs. 631-672, septiembre de 2010.

Sitio web de la misión Kepler: **kepler.nasa.gov**


INFORME ESPECIAL
LA EDUC
ERA
DIGI
F6
F6


CACIÓN
EN LA
ITAL
F6



EN SÍNTESIS

La analítica de datos y la emisión de vídeos en tiempo real (*streaming*), entre otras técnicas, se están filtrando del mercado de consumo a los centros educativos, desde el parvulario hasta la universidad.

Los cursos masivos y gratuitos, accesibles mediante Internet, proporcionan enseñanzas universitarias a regiones remotas.

Plataformas de enseñanza adaptativa rastrean de cerca el progreso del estudiante, ajustan los contenidos a sus capacidades personales y pronostican sus resultados.

Con todo, los críticos advierten que debe invertirse tanto en la formación del profesorado como en tecnología.

INTRODUCCIÓN

LAS TIC VAN A LA ESCUELA

Las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) están reformando todos los aspectos de la enseñanza. A la vez que dan acceso a cursos de calidad a las gentes más pobres del mundo, remodelan la forma de aprender de todos los estudiantes

Las aulas no han cambiado mucho en los últimos siglos: los estudiantes van a clase, reciben explicaciones o lecciones magistrales, toman apuntes y hacen deberes. Los docentes, por su parte, imparten sus materias, y, de cuando en cuando, administran controles o exámenes. Los estudiantes, sobre todo los menos favorecidos, suelen asistir a las escuelas o universidades más cercanas a su hogar, cualquiera que sea su calidad.

Esas rutinas están empezando a cambiar. En número todavía reducido, pero cada vez mayor, los alumnos presencian las explicaciones «en línea» y asisten a clase dispuestos a realizar las tareas que se les encomienden y a colaborar con sus profesores y compañeros. Interactúan con programas informáticos que les permiten avanzar a su ritmo, sin tener que marchar al paso del resto de la clase. Los profesores utilizan, también ellos, esos mismos programas, para evaluar los exámenes y tareas propuestas, lo cual les permite seguir de cerca el progreso de más alumnos a la vez. Y las escuelas locales no son ya la única opción que tienen los estudiantes. Organizaciones e iniciativas sin ánimo de lucro hacen accesibles cursos en línea de gran calidad a todos los que puedan conectarse a Internet.

¿Qué promueve toda esta revolución digital? Una de las razones estriba en que las escuelas y universidades se ven sometidas a mayor presión que nun-

MITCH PAYNE *(fotografía)*; KYLE BEAN *(ilustración)*

ca. Cada vez son más los estudiantes que aspiran a elevar su nivel de formación, en un momento en que las apreturas y recortes de presupuesto hacen que para los centros sea difícil, cuando no imposible, contratar el personal que necesitan. Al propio tiempo, los gobiernos e instituciones —espoleados, a su vez, por las empresas— están poniendo cada vez más alto el listón que los jóvenes habrían de superar en cada etapa escolar.

Muchos ven la solución en la tecnología. Los escépticos, en cambio, aducen que esta no suma gran cosa a lo que ya pueden hacer los docentes y temen, además, que ponga en peligro la privacidad del estudiante.

En este informe especial, *Investigación y Ciencia* explora las fronteras de la nueva era digital en la enseñanza, así como sus implicaciones para las familias, los alumnos, los docentes y la sociedad en su conjunto.

—La redacción

JONATHAN TORGOVNIK



VENCER A LA SUERTE: Cursos en línea, con el respaldo de docentes in situ, están facilitando a más ruandeses el acceso a estudios superiores.



NUEVOS MÉTODOS

CURSOS EN LÍNEA MASIVOS Y ABIERTOS

Una mirada al interior de un osado experimento para llevar instrucción de máximo nivel a los lugares más menesterosos del planeta

Jeffrey Bartholet

Tujiza Uwituze puso todo su empeño y logró quedar entre las primeras del curso en su escuela secundaria de Ruanda. Pero su formación, según las normas internacionales, resultaba endeble. Le habían hecho memorizar y regurgitar datos y más datos; en su escuela no tenía acceso a ningún ordenador. El inglés de Uwituze es deficiente; sus conocimientos de informática, rudimentarios. Vive en Kigali con un tío abuelo y ha conseguido ahorrar unos 60 euros. A pesar del esfuerzo e intenso deseo de salir adelante, sus sueños no están a su alcance. O tal vez sí, gracias a un proyecto innovador que podría cambiar por completo su vida.

El propósito del experimento, llamado Kepler y dirigido por Generación Ruanda, una pequeña organización filantrópica, consiste en utilizar cursos en línea masivos y abiertos (*massive open online courses,* MOOC) para proporcionar enseñanzas de máximo nivel a jóvenes ruandeses nacidos en torno a 1994, el año del genocidio. El primer ensayo comenzó en marzo, con un curso piloto titulado «Pensamiento crítico sobre problemas globales», ofrecido por la Universidad de Edimburgo. Una docena de estudiantes presenciaron las lecciones en vídeo, descargadas desde una plataforma MOOC, y asistieron a seminarios y a sesiones de formación en un aula de Kigali, con el apoyo, en persona, de un docente, una forma de enseñanza llamada aprendizaje mixto (*blended learning*).

Para una estudiante como Uwituze, que era un bebé en 1994, cuando los hutus masacraron a unos 800.000 tutsis y hutus simpatizantes de estos, se trataba de una oportunidad extraordinaria. Su familia tuvo que huir: primero a Burundi, después a Tanzania, y por fin, a Kenia. «Perdimos el dinero, la casa, lo perdimos todo», explica. Tras años de continua mudanza, tan solo había recibido una escasa escolarización. Regresó a Ruanda con 14 años y se graduó

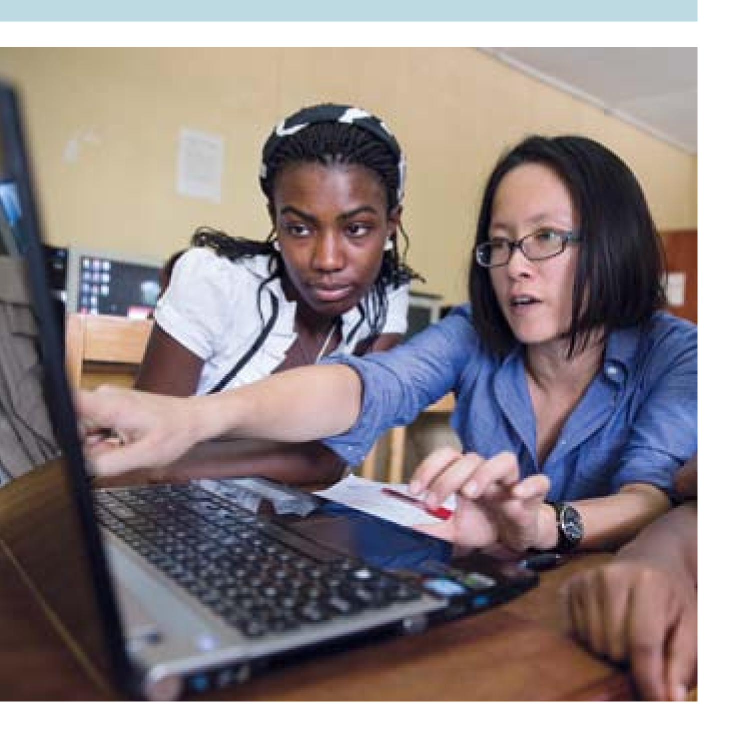


EDUCACIÓN A DISTANCIA: En Kigali, Uwitze, sentada junto a su madre, pretende graduarse en contabilidad, que estudia sobre todo a través de cursos en línea.

en secundaria el pasado noviembre. La matrícula anual de las universidades públicas ruandesas ronda unos 1200 euros —más de lo que la familia de Uwituze se puede permitir— para unas enseñanzas de pobre calidad. Su madre está en paro y Uwituze tiene tres hermanos menores que buscan sostén en ella. Al ser rechazada por una organización que ayuda a los estudiantes ruandeses a buscar becas en universidades estadounidenses, un funcionario de ese grupo le sugirió que solicitase participar en Kepler; Uwituze fue una de los 15 estudiantes invitados al curso piloto, concebido para ensayar el formato MOOC. Después solicitó entrar en una clase más numerosa que iniciará un currículo MOOC completo el próximo otoño.

Kepler recibió 2696 solicitudes ante las 50 plazas de las que disponía. El pasado abril, se invitó a 600 estudiantes para que realizaran pruebas de acceso, 200 de los cuales (Uwituze entre ellos) lograron pasar a una segunda ronda de selección. Los preseleccionados fueron entrevistados en persona y participaron en actividades grupales, supervisadas por personal de Kepler, para calibrar rasgos de su personalidad, como aptitud de liderazgo, capacidad de colaboración y destreza en la resolución de problemas. El objetivo consistía en crear una clase que combinase un abanico de rasgos caracterológicos: extroversión y reserva, diversión y seriedad, creatividad y meticulosidad. Era mucho lo que se jugaban. Jean Aimé Mutabazi no superó la primera selección y perdió el rumbo. La mayoría de sus parientes masculinos, entre ellos el padre, fueron asesinados en el genocidio. Vive con su madre, tullida de una pierna, que se gana la vida vendiendo carbón vegetal en una chabola. «¿Podéis imaginar lo que significa tener un problema y que no haya nadie a quien pedir ayuda?», apunta Mutabi. «La educación es una especie de poder mágico que te abre puertas en el mundo. Si gozas de ella, puedes controlar la situación en la que vives.»

Uwituze superó la selección final. En un principio deseaba convertirse en piloto comercial, pero ahora la considera una opción fuera de su alcance y se ha orientado hacia una posible carrera bancaria. Gracias a Kepler podrá estudiar contabilidad y temas empresariales. «La educación me brinda la única oportunidad para poder sobrevivir; es la única que me permite cuidar de mis hermanas, que me necesitan», asegura. Los admitidos para el curso de otoño recibirán, sin costo, clases en línea de universidades punteras, con apoyo y tutoría de docentes estadounidenses en Kigali; también tendrán pagada la manutención. Jamie Hodari, director ejecutivo de Generación Ruanda, estima que tras una dotación inicial de 100.000 dólares para el diseño curricular y la evaluación, el coste anual per cápita en concepto de tasas y otros gastos le supondrá a su organización alrededor de 2000 dólares, incluidos los ordenadores portátiles y el salario de los docentes. Confía en que, con el tiempo, esa cifra se podrá reducir a 1000 dólares. En un principio, los estudiantes deben realizar un grado de dos años (*associate arts degree*) en estudios generales, enfocados hacia el mundo empresarial, de la Universidad de New Hampshire del Sur; esta dispone ya de un programa vanguardista y concede diplomas basados en competencias demostradas, no en el número de horas de asistencia a clase. Cuando los alumnos terminen la formación en el segundo año, Kepler planea ofrecer-



UN TOQUE PERSONAL: La profesora Christine Yarng refuerza los cursos en línea reuniéndose en persona con los estudiantes.

35%

Porcentaje de docentes de primaria y secundaria en EE.UU. con acceso a una tableta o a un lector electrónico en sus clases

Enseñanza personalizada

Miles de estudiantes pueden disponer en línea del equivalente a la tutoría individual

Peter Norvig

Se sabe desde hace 30 años que los estudiantes rinden más con la tutoría individual y el aprendizaje para el dominio (*mastery learning*) orientado a la adquisición de competencias, no solo para superar un examen. El éxito también exige motivación, sea por querencia propia o inducida por padres, mentores o compañeros.

¿Van a invalidar los MOOC estos factores de éxito? De ningún modo. De hecho, la informática nos ofrece la mejor vía hacia una enseñanza individualizada y rentable.

Lo sé bien porque he enseñado de ambos modos. Sebastian Thrun y yo llevamos años dando clases de inteligencia artificial en la Universidad Stanford y en otros centros; hemos explicado en clase, indicado trabajos y, llegado el día, propuesto un mismo examen a todos los alumnos en una sola sesión. En cada semestre, solo un 5 o un 10 por ciento de los estudiantes participaban de forma regular, fuera en debates en el aula o en las horas de atención al alumno; el resto tenía una actitud más pasiva. Pensábamos que debía haber una mejor forma de hacer las cosas.

En otoño de 2011, realizamos un experimento. Además de impartir clases tradicionales, creamos un curso en línea, gratuito, abierto a todos. En nuestro primer ensayo conseguimos que se inscribieran unas 100.000 personas (la población de una ciudad); lo terminaron 23.000.

Inspirados por el comentario del nóbel Herbert Simon, «el aprendizaje es el resultado de lo que el alumno hace y piensa, y solo de lo que él mismo hace y piensa», creamos un curso concebido para que el estudiante «hiciera cosas» y obtuviera una realimentación frecuente. Nuestras lecciones eran breves (vídeos de entre dos y seis minutos) y pretendían estimular la resolución del ejercicio siguiente. Ciertos problemas requerían la aplicación de técnicas matemáticas expuestas en los vídeos. Otros consistían en cuestiones abiertas, que incitaban al estudiante a pensar por sí mismo y depurar después sus ideas en foros de debate en línea.

Nuestro plan de estímulo al aprendizaje activo, frente al pasivo, ofreció numerosas ventajas, parejas a las de las tutorías individualizadas, e incentivó la motivación. En primer lugar, como ha demostrado en 2013 un estudio efectuado por Karl K. Szpunar, Novall Y. Khan y Daniel L. Schacter, publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, la interacción frecuente evita que la atención se distraiga. En segundo lugar, como William B. Wood y Kimberly D. Tanner exponen en un artículo de *Life Sciences Education*, el aprendizaje se potencia cuando los estudiantes se esfuerzan en construir sus propias explicaciones, en lugar de escuchar pasivamente las del docente. Por ese motivo, un sistema inteligente de tutoría automatizada puede propiciar el aprendizaje y el estudio tan bien como los instructores humanos, según ha descubierto Kurt van Lehn en un metanálisis publicado en *Educational Psychologist*.

Una última ventaja ha consistido en el rápido perfeccionamiento del curso propiamente dicho. Analizábamos aquellos puntos críticos, donde nuestros alumnos podían tropezar o acertar, e identificábamos lo que debía modificarse. Y algo aún mejor, podíamos hacernos con dicha información casi hora a hora. En nuestra clase presencial, los datos eran analizados por instructores humanos, pero un sistema de inteligencia artificial podría realizar tal función y aconsejar en qué aspectos el alumno podría mejorar, igual que en el comercio por Internet se hacen recomendaciones automáticas sobre los libros o películas que pudieran ser de nuestro gusto.

La enseñanza en línea representa un instrumento, lo mismo que un libro de texto. Lo verdaderamente importante es la forma en que el instructor y el alumno los utilicen.

Peter Norvig *es director de investigación en Google, miembro y consejero de la Asociación para el Progreso de la Inteligencia Artificial y coautor, con Stuart Russell, de* Artificial Intelligence: A Modern Approach *(Pearson, 2010).*





les grados en administración de empresas, informática, y tal vez en ingeniería, de diversas instituciones.

Uwituze tiene reparos sobre la metodología en línea, pues teme que el experimento falle o que sus títulos no sean muy aceptados, pero sí confía en que va a aprender más con Kepler que en una universidad ruandesa tradicional.

DONDE MÁS REPERCUTEN

Llevar los mejores cursos universitarios del mundo a algunas de las personas más necesitadas constituye, sin duda, la esperanza —y algunos dirían el reclamo— de los MOOC. Entre las grandes plataformas MOOC se cuentan Udacity y Coursera, empresas con fin lucrativo cofundadas por profesores de la Universidad Stanford, o edX, sin ánimo de lucro y gestionada por el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) y la Universidad Harvard. Todas declaran explícitamente su propósito de derribar las barreras geográficas y de clase social para acceder a la educación superior. Daphne Koller, cofundadora de Coursera, expuso sus objetivos para cambiar el mundo en una conferencia TED (Tecnología, Entretenimiento, Diseño) en junio de 2012, vista más de un millón de veces. Los MOOC establecerían la educación como un derecho humano fundamental, donde cualquiera con capacidad y motivación en cualquier lugar del mundo obtendría las habilidades y conocimientos necesarios para buscar una vida mejor para sí, sus familias y sus comunidades, proclamó ante un público entusiasta. «Quizás el próximo Albert Einstein, o el siguiente Steve Jobs, esté viviendo en alguna remota aldea africana; si pudiéramos ofrecer educación a esas personas, podrían descubrir la próxima gran idea que haga del mundo un lugar mejor para todos.»

Nadie puede oponerse a un objetivo así. Pero los profesionales de la enseñanza en línea objetan que los predicadores de los MOOC tienden a exagerar el valor de su producto y de sí mismos. Señalan que la enseñanza a distancia se implantó hace ya muchos años, antes de la llegada de los MOOC, y que estos a menudo no incorporan los mejores y más novedosos métodos didácticos. Señalan también que la mayor parte del mundo subdesarrollado carece de conexión a Internet, y que los MOOC exigen una motivación y unas habilidades que solo poseen estudiantes excepcionales. «Lo que hace falta es una solución acorde con la realidad actual del Tercer Mundo», afirma Tony Bates, especialista en enseñanza a distancia. Aunque los contenidos resulten gratuitos en el futuro, el estudiante todavía necesitará los servicios que proporcionan los docentes: cómo estudiar, cómo y dónde encontrar la información, el análisis crítico, aprender a tener ideas propias y a razonar a un alto nivel. Tales destrezas se adquieren y desarrollan mediante la interacción con un docente.





ILUSIONADOS: **Emmanuel Ngoga, Soubirous Umutoni y Pascal Uwihoreye (*de arriba a abajo*) participaron en el curso piloto de Kepler.**

El programa Kepler tiene en cuenta ese aspecto, al combinar los contenidos gratuitos, los mejores profesores del mundo y los instructores que proporcionan ayuda y estímulo de forma individual. El modelo se adapta especialmente a países como Ruanda, donde un porcentaje muy reducido de la población posee un título universitario y donde el número de jóvenes que han finalizado la enseñanza secundaria se está disparando. «Aunque

se construyeran cincuenta universidades, no se cubriría la demanda», explica Hodari. «Y aquí hay personas que no pueden acceder a los estudios superiores, mientras que si se hallaran en EE.UU. serían admitidas en Princeton.»

En EE.UU., los enfebrecidos debates sobre las posibilidades de los MOOC se centran, sobre todo, en rebajar los costes de los títulos. Koller señalaba en su conferencia TED que, desde 1985, las tasas en los centros universitarios estadounidenses se han ido elevando a un ritmo de casi el doble que el de los costes en sanidad, de modo que ha propuesto los MOOC como solución. Pero en el mundo en vías de desarrollo, la calidad representa la cuestión más importante. Las instalaciones y el nivel de instrucción de muchos países resultan lamentables y, con frecuencia, los títulos que expiden carecen de valor para compañías que han de competir a escala global. Así, los ruandeses que han seguido cursos de informática cuentan con una escasa experiencia en el uso de ordenadores.

Lo cual sucede no solo en un país pequeño como Ruanda, sino también en una gigantesca potencia emergente como la India. Las mejores universidades de ese país producen excelentes titulados, pero fuera de ellas, la calidad cae a plomo. Se ha dado mucha publicidad al enorme número de ingenieros que se titulan en la India. Pero de los 600.000 a 800.000 que se gradúan en un año, solo un 10 por ciento ha recibido una formación de calidad, opina Ashok Jhunjhunwala, profesor de ingeniería eléctrica de máximo prestigio en ese país.

Una serie de comprobaciones han revelado varias deficiencias. Solo el 7 por ciento de los titulados en ingeniería informática alcanzaría el nivel de programación básica exigido por la industria, explica Varun Aggarwal, cofundador y jefe de operaciones de Aspiring Minds, una compañía que realiza pruebas de personal para industrias. Una evaluación llevada a cabo en 2011 sobre 55.000 titulados indios en ingeniería demostró que un alarmante 42 por ciento de ellos no sabía multiplicar o dividir números con decimales. Y más de una cuarta parte no poseía el nivel de inglés suficiente para abordar el plan de estudios de una escuela de ingeniería.

Parte del problema reside en la mediocridad de los instructores. Según Aggarwal, la docencia no está bien pagada y no se considera una carrera atractiva. Los ingenieros que no consiguen un empleo en la industria buscan trabajo en la enseñanza. Otro obstáculo es la pobre preparación de los estudiantes antes de comenzar los estudios superiores. Muchos no dominan el inglés cuando ingresan en la universidad, donde la enseñanza se hace en ese idioma.

Si nada cambia, probablemente la situación empeorará. De hecho, la India cuenta con uno de los mayores sistemas de educación superior del planeta, con más de 600 universidades y

No más enseñanza a paso fijo

La tecnología puede humanizar el aula

Salman Khan

En cuanto se piensa en algo virtual, de inmediato es comparado con su homólogo material: Amazon frente a las librerías tradicionales, Wikipedia frente a las enciclopedias impresas. Se da por supuesto que lo digital va a reemplazar lo material con un producto más barato, más rápido y eficiente. En la educación, sin embargo, lo virtual va a originar un cambio muy diferente. No se trata de sustituir las aulas de siempre. Tenemos la posibilidad de conjugar lo virtual y lo material para repensar por completo la enseñanza.

En nuestros días, los estudiantes van a clase, ocupan sus asientos, escuchan y toman apuntes mientras el profesor imparte. A pesar de que en el aula puede haber entre 20 y 300 personas, apenas existe interacción entre ellas. A menudo, la primera oportunidad que tiene el profesor de saber hasta qué punto los alumnos digieren las enseñanzas impartidas es en los exámenes. Y aunque en estos se aprecien lagunas en la comprensión de alguna noción importante, el curso prosigue hacia conceptos más avanzados.

Las medios virtuales están ofreciendo la posibilidad de reconsiderar esta metodología. Si la lección está disponible en línea, puede destinarse un tiempo de clase al debate, la tutoría o el análisis dirigido por el profesor. Si se ahorra el tiempo de clase dedicado a la lección, porque se dispone de un sistema adaptativo de ejercicios y diagnósticos bajo demanda, no hay necesidad de continuar con el modelo fabril heredado de la Prusia decimonónica, en el que los estudiantes son obligados a avanzar a un ritmo dado. En lugar de ello, estos pueden progresar a su propio paso y demostrar sus conocimientos mucho después de concluido el curso formal.

Durante los próximos 10 a 20 años, este aprendizaje mixto permitirá también desvincular la formación de la titulación, funciones que se encomiendan hoy a una misma y única institución. Con el nuevo procedimiento, quien lo desee podrá demostrar su competencia, a un elevado nivel, en ciertas destrezas, tanto si las aprendió en su puesto de trabajo, en una escuela con techos y paredes, a través de un recurso en línea o, lo que resultará más probable, mediante una combinación de todos ellos.

Tal vez el efecto más poderoso de esta realidad sea la repercusión sobre la calidad de las lecciones y, en general, sobre la totalidad de los materiales educativos. Los profesores y las editoriales de libros de texto tradicionales apenas conocen el uso que se da a su contenido o si este es comprendido por los destinatarios. Al combinar medios físicos y en línea, los creadores de contenidos y los docentes pueden, en última instancia, disponer de datos actualizados y detallados sobre la eficacia de las experiencias de las que son autores.

En esta enseñanza mixta, la función que desempeña el profesor gana valor. En lugar de dedicar el grueso de su tiempo a explicar, confeccionar exámenes y calificarlos, puede interactuar con sus alumnos. En vez de fomentar en los estudiantes una actitud pasiva de sentarse y escuchar, profesores y tutores los retarán a protagonizar su propio aprendizaje, la destreza más importante de todas. Sin duda, para un estudiante motivado de alguna parte del mundo empobrecido estos instrumentos virtuales —una vez superadas las cuestiones de accesibilidad— pueden facilitar casi toda su instrucción. En el mundo desarrollado, el resultado óptimo consistiría en potenciar los recursos en línea, de modo que el tiempo físico sea menos pasivo y más humano.

***Salman Khan** es fundador de la Academia Khan, institución educativa sin ánimo de lucro con sede en Mountain View, California.*

más de 33.000 escuelas universitarias que ofrecen instrucción a más de 20 millones de alumnos. Aun así, una baja proporción de jóvenes en edad universitaria continúan estudiando tras la enseñanza secundaria, en comparación con otros países. La proporción relativa de matriculación corresponde al 17,9 por ciento, en contraste con el 26,8 de China y el 94,8 por ciento de Estados Unidos. Para alcanzar un valor del 50 por ciento, tendrían que ingresar más de 30 o 40 millones alumnos nuevos, explica Anand Sudarshan, exdirector general de Manipal Global Education, que gestiona seis universidades y más de otras cuarenta instituciones de enseñanza. «Y tal como van las cosas, eso no va a suceder. La única forma en que la India podría ponerse a la par, tanto en cantidad como en calidad, sería mediante una enseñanza basada en la tecnología.»

UN REGALO DEL CIELO

¿Representan los MOOC la solución, en la India o en otros lugares?

Una minoría de estudiantes excepcionales los considera un don del cielo. «Muchos siguen nuestros cursos de forma individual, casi autodidacta, y recibimos abundantes correos y otras comunicaciones sobre el modo en que la experiencia está cambiando su vida», asegura Koller, de Coursera. «Numerosas personas del mundo en vías de desarrollo no podrían acceder de otro modo a una educación de alta calidad. No es una cuestión desdeñable.»

Veamos el caso de Amol Bhave, un joven de 17 años de Jabalpur, en la India, que a los 16 siguió un MOOC del MIT llamado «Circuitos y electrónica». Desde niño, Bhave había estado curioseando en los libros de ingeniería de su padre y aprendió por sí solo a programar en BASIC. Cuando todavía se hallaba en la escuela secundaria obtuvo una Certificación Microsoft en programación. También se aficionó a la electrónica. Como estudiante de bachillerato, terminó con éxito «Circuitos y electrónica», y cuando edX no le concedió el curso de continuación, «Señales y sistemas», sufrió un fuerte desencanto. Así que se asoció con otros dos estudiantes que conoció a través de Internet para crear su propia versión MOOC del curso, basado en lecciones grabadas en vídeo del MIT y problemas en línea, así como otros elementos interactivos pensados por Bhave. Asegura que él mismo desarrolló un código a partir de cero. Unos 1100 alumnos participaron en el curso. Bhave mencionó ese trabajo cuando solicitó ingresar en el MIT como estudiante con dedicación plena, este mismo año. «El 14 de marzo se publicó la lista de admitidos. ¡Y yo lo estaba! Mi familia y yo estamos entusiasmados. Por primera vez alguien de mi ciudad va a ir al MIT para realizar estudios universitarios.»

Esta anécdota tiene una doble lectura. Primera, el curso del MIT ofreció una fantástica oportunidad a un joven que vivía en la India central; y segunda, los MOOC no pueden reemplazar plenamente los cursos tradicionales, pues la máxima aspiración de Bhave consistía en volar a Estados Unidos y asistir al MIT en persona. Las razones de ese empeño son claras.



Una oportunidad para la India

Los cursos en línea pueden mitigar la escasez de docentes y mejorar la enseñanza

Pawan Agarwal

Las tecnologías informáticas ofrecen la posibilidad de transformar por completo la enseñanza superior en la India. Un nuevo modelo, alzado en torno a una combinación de cursos en línea masivos y abiertos (MOOC) desarrollados en nuestro país, más los proporcionados por universidades extranjeras de primera categoría, podría facilitar educación superior a una escala y con una calidad hasta ahora inviables.

La matriculación universitaria en la India es enorme y va en aumento. En 2010 superó en número la correspondiente a EE.UU. y solo China la precedió. Cada día se producen 5000 nuevos ingresos y abren sus puertas 10 instituciones nuevas.

La inversión del país en educación superior (más del 3 por ciento del PIB) se cuenta entre las mayores del mundo. No obstante, el gasto por alumno es de los menores. La expansión reciente, a la par que ha ampliado el acceso a la universidad, ha reducido todavía más la inversión por estudiante y ha agravado la aguda escasez de docentes ya existente. La calidad, en consecuencia, se ha resentido.

La India tiene que seguir promoviendo el acceso a la enseñanza superior mientras mantiene la calidad y reduce los costes. No se trata del único país que persigue tal objetivo, pero debido a su enorme tamaño y su singular ubicación, los problemas a los que se enfrenta resultan formidables. La tecnología informática, y en especial los MOOC, podrían ayudar a avanzar.

La India ya había experimentado con clases en línea en el pasado, pero con un resultado poco alentador. Hace unos diez años, se empezó a utilizar Internet para distribuir cursos en vídeo a través del Programa Nacional de Enseñanza Reforzada con Tecnología, de financiación estatal. Los desarrolladores crearon más de 900 cursos, sobre todo de ciencias e ingenierías, con unas 40 horas de instrucción cada uno. Debido a su calidad desigual y limitada interactividad, no lograron atraer a un gran número de estudiantes.

Los MOOC han brindado a los docentes indios una idea más clara de cómo reestructurar una lección en segmentos breves y autónomos, muy interactivos, que impliquen con mayor eficacia a los estudiantes. Pronto se prevé que los Institutos Indios de Tecnología, considerados entre las mejores escuelas de ingenie-

Para empezar, resulta difícil estudiar ciencia «dura», como él deseaba, si no se realiza investigación en un laboratorio. Y, más importante todavía, Bhave no puede obtener un título del MIT mediante estudios en Internet, un aspecto clave en la carrera profesional.

En cualquier caso, la inmensa mayoría de los jóvenes indios quizá carezcan de la iniciativa y el ingenio de Bhave. Además, él contaba con la ventaja de pertenecer a una familia que podía proporcionarle un ordenador y una conexión fiable a Internet. Su padre es ingeniero y pudo permitirse enviar a Bhave a un colegio privado de secundaria. La penetración de Internet en la India está mejorando, pero todavía resulta muy deficiente: en 2011, solo el 10 por ciento de los indios utilizaron Internet. En gran parte del país no se dispone de un suministro eléctrico estable, y la renta per cápita anual no alcanza los 1500 dólares. Para centenares de millones de indios, un ordenador representa un lujo inimaginable.

La tecnología, empero, se está difundiendo y abaratando. Incluso un país del interior de África, como Ruanda, está entretejida por una red de cables de fibra óptica que va ampliándose año tras año. Los dispositivos informáticos se están volviendo más económicos: por encargo de la India, la firma británica Datawind ha producido una tableta básica con Android por unos 35 euros, y el Gobierno indio se la proporciona a los estudiantes por la mitad de ese precio. La Aakash 2 no puede competir con las tabletas de gama alta, pero a ese coste podría suponer una revolución y cambiar la situación del país. Datawind ambiciona enviar a la India un millón de ejemplares este año.

También los MOOC están evolucionando. Michael Horn, cofundador del Instituto Clayton Christensen de Innovación Transformadora, un laboratorio de reflexión sobre la innovación educativa y sanitaria, compara los MOOC de hoy con las primeras películas cinematográficas, que reproducían obras representadas en teatros y parecían torpes y absurdas. Ahora se están filmando las lecciones y después se montan. En parte por esta razón, menos del 10 por ciento de quienes se inscriben en cursos MOOC los terminan. Horn espera que las lecciones en línea se vayan volviendo cada vez más atractivas. El objetivo consiste en producir cursos interactivos que no solo sirvan para instruir a los estudiantes, sino también para aprender de estos, de modo que la enseñanza se adapte a las necesidades y capacidades de cada uno.

Algunos educadores contemplan incluso desvincular el aprendizaje y la evaluación: un estudiante que siga un MOOC y, tras ser puesto a prueba, logre un título de alto nivel basado en competencias demostradas, podría resultar más competitivo en el mercado laboral que el mero poseedor de un título de una universidad presencial.

Se trata todavía de un futuro hipotético. Hoy por hoy, los estudiantes no suelen ver beneficios tangibles en los MOOC. En el mundo en desarrollo, quizá más que en otros sitios, los más jóvenes necesitan confiar en que una determinada preparación les llevará a un empleo y a una nómina. Los estudiantes han de ver una continuidad clara entre seguir ciertos cursos, obtener la certificación correspondiente y lograr el reconocimiento de los empleadores, explica Aggarwal. Los cursos han de adaptarse a lo que la industria está buscando. Si ello se consigue y el estudiante lo ve claro, los MOOC se potenciarán.

Los proveedores de estos cursos aspiran a conceder títulos que sean aceptados por centros universitarios y empleadores, un aspecto que todavía se halla en las primeras fases. Parte del reto consiste en crear mecanismos de seguridad contra plagios y falsificaciones. Uno de los métodos exige la presencia física del estudiante en el centro de examen; otros son tecnológicos. «Realizamos una comprobación de la escritura (*signature track*), en la que se pide al sujeto que envíe una foto de identificación al principio; después, cuando presenta las tareas, debe tomarse una foto y proporcionar una muestra de cómo mecanografía», dice Andrew Ng, cofundador, con Koller, de Coursera. El ritmo con que se escribe es característico de cada uno y difícilmente se hallarán dos individuos que tecleen del mismo modo. El proceso se denomina biometría dactilográfica y puede utilizarse para certificar que quien está realizando una tarea asignada coincide con la persona que se inscribió en el curso.

Coursera está trabajando también con un sistema llamado ProctorU, en el que los exámenes se vigilan por cámara web. ProctorU pide a los alumnos que presenten uno o varios documentos de identidad y que utilicen su ordenador para inspeccionar el lugar y demostrar que no hay en él material de ayuda. Los examinados pueden tener que cumplimentar un cuestionario de múltiples opciones sobre su formación previa —elaborado a partir de información obtenida de bases de datos públicas— como verificación de su identidad. A continuación, un empleado de ProctorU vigila a los estudiantes durante el examen a

66%

Porcentaje de directores de escuelas universitarias estadounidenses que ven prometedoras las técnicas de enseñanza y evaluación adaptativas.

FUENTE DE DATOS: «THE 2013 INSIDE HIGHER ED SURVEY OF COLLEGE AND UNIVERSITY PRESIDENTS», POR INSIDE HIGHER ED AND GALLUP. INSIDE HIGHER ED, 2013

ría del mundo, ofrezcan a centenares de miles de estudiantes MOOC básicos de tecnología informática sobre estructuras de datos, programación y algoritmos. Los cursos supondrían créditos y contarían para obtener titulaciones.

Que en la India abunden los jóvenes que se manejan francamente bien con la tecnología constituye una ventaja adicional. Los indios se cuentan entre los usuarios más decididos de los MOOC. De los 2,9 millones de personas registradas en Coursera en marzo pasado, más de 250.000 pertenecían a este país, precedidos solo por EE.UU.

Pero todavía hemos de hallar el modelo adecuado para aplicar los MOOC en la India. Con diez años de experiencia en este ámbito y un vibrante ecosistema tecnológico, muy probablemente el país no tardará en encontrar su camino.

***Pawan Agarwal** es asesor de enseñanza superior en la Comisión de Planificación del Gobierno indio. El autor expresa aquí sus opiniones personales.*



«La experimentación es esencial»

El futuro de la enseñanza en los campus depende de la correcta combinación de medios informáticos y tradicionales

Robert A. Lue

El primer curso que impartí en línea, hace más de diez años, representó una rareza en mi departamento. Mi motivación principal consistía en compartir información sobre la biología del VIH, en un esfuerzo conjunto de combatir los numerosos errores y malentendidos acerca del sida en la concepción popular. El curso incluía tomas de vídeo de lecciones en el aula, que eran transmitidas al mundo como parte de nuestros programas de educación continua.

La situación es hoy notablemente distinta. En mayo de 2012, la Universidad Harvard y el Instituto de Tecnología de Massachusetts anunciaron la creación de edX, una asociación institucional que pretendía ampliar el acceso a una enseñanza de alta calidad mediante clases en línea, además de transformar la docencia y el estudio en nuestros respectivos campus. El interés de los claustrales por la enseñanza en línea se ha multiplicado, si bien prosigue un saludable diálogo sobre la posible repercusión de la elevada disponibilidad de los cursos en la Red.

El objetivo de las clases en línea no se limita a compartir materiales de enseñanza a través de Internet; se trata también de desarrollar nuevas formas de docencia basadas en dichos materiales, dirigidas tanto a los estudiantes del campus como de fuera de él. Muchos de mis colegas están aplicando ya medios informáticos tomados de cursos en línea en un esfuerzo por transformar las vivencias de los alumnos aquí en Cambridge (Massachusetts). Por ejemplo, cada tutorial en vídeo y cada evaluación interactiva desarrollados para el curso introductorio en ciencias de cómputo de David J. Malan refuerzan el aprendizaje en el campus de Harvard. El *software*, que diseñó para proporcionar a los alumnos retroalimentación instantánea sobre la calidad de los programas que creaban, resulta igualmente útil para los alumnos de formación presencial y virtual. De modo análogo,

través de la cámara web. El proceso reviste mayor dificultad en el extranjero, pero resulta factible.

Los proveedores de MOOC ven también la concesión de títulos como una forma de sacar provecho económico de sus servicios. Los cursos de Coursera, por ejemplo, son gratuitos para el estudio individual, pero las credenciales no. En este momento, si un estudiante opta por inscribirse en un curso de la Universidad Duke en Coursera, con comprobación de la escritura, tendría que abonar una matrícula de menos de 100 dólares. Tras realizar el curso y aprobar los exámenes, el alumno recibe una «certificación verificada» con un sello de Duke. Existen recomendaciones sobre el número de créditos asignados a varios cursos, validados por el Consejo Estadounidense de Educación, que son aceptadas por numerosas instituciones tradicionales. Su coste oscila entre 100 y 190 dólares. Coursera ofrece, asimismo, ayudas económicas a participantes que no pueden permitirse tales precios.

Estas soluciones tecnológicas a gran escala se antojan todavía demasiado ambiciosas para lugares donde falta el agua potable y no hay sistemas de saneamiento. Por el momento, el objetivo principal en la India consistirá en explorar la utilidad de los MOOC para mejorar la calidad de la enseñanza en instituciones ya existentes. Microsoft Research está trabajando en un proyecto piloto para crear clases en línea al estilo de los MOOC, impartidas por distinguidos profesores indios, que se ajustarían a los planes de estudio de las escuelas de ingenieros de ese país. El programa se denomina Enseñanza de Calidad a Gran Escala (*Massively Empowered Classrooms*, o MEC). No existe una solución universal, válida para todos, opina Jhunjhunwala. El profesor considera que la mayoría de los estudiantes indios, por razones culturales y de idioma, tendrían serias dificultades para seguir con éxito los cursos en línea ofrecidos por universidades estadounidenses. Recuerda su desconcierto como estudiante, en un curso de química, porque no entendía el acento de su profesor estadounidense. «Tomar algo del exterior e importarlo sin más no funciona», asegura.

Los defensores de los MOOC aducen que se utilizan libros de texto de máxima calidad en todo el mundo y que las clases en línea pueden considerarse una especie de manual digital. Pueden diseñarse cursos para un público muy variado. En Europa se están desarrollando plataformas MOOC propias, y los grandes proveedores estadounidenses de estos cursos están firmando convenios con universidades extranjeras para proporcionar clases en otros idiomas. La enseñanza en línea se halla todavía en sus albores, opina Bhave, que rebosa de idealismo juvenil. Pero sin duda tiene una posibilidad de cambiar la faz del mundo en desarrollo. Basándose en su propia experiencia, cree que en los años venideros se producirá una revolución educativa.

UN EXPERIMENTO CON MUCHO EN JUEGO

Los educadores de Kepler no están a la espera. Para ellos existe un único modelo factible: proporcionar en línea la mejor instrucción que puedan ofrecer los mejores docentes, pero acompañada de un importante apoyo presencial y de interacción en clase. «La idea de ofrecer MOOC sin más a los africanos, o a otras gentes, sin facilitación ni ayuda, fracasaría», afirma Hodari. «A muchos estudiantes no se les ha enseñado a usar un

E. Francis Cook y Marcello Pagano, de la Escuela de Salud Pública de Harvard, han desarrollado un novedoso curso en línea de bioestadística y epidemiología, que utilizarán este mismo año para apoyar un modelo de clase inversa (*flipped classroom*), en el que los estudiantes ven en línea las lecciones y otros materiales, mientras que en clase debaten lo estudiado con compañeros y docentes.

La rápida evolución de los recursos digitales, como vídeos, herramientas multimedia interactivas o nuevas formas de evaluación, nos reta a pensar lo que podemos y debemos hacer cuando nos hallamos frente a nuestros alumnos. Así, mientras preparo un nuevo curso sobre metabolismo celular, me planteo que una combinación de animaciones y autoevaluaciones integradas en el curso tal vez permitirá exponer mejor las complejidades de la transferencia electrónica que esa parte de mi lección tradicional. Una vez reestructuradas las tareas, de modo que los materiales en línea y las lecturas propuestas representen el mismo volumen de trabajo, gano tiempo para debatir en clase, con mis alumnos, sobre las consecuencias metabólicas de la perturbación experimental de la transferencia de electrones. En otras palabras, puedo dedicar más tiempo a las nociones que les resultan más difíciles. En este aspecto, la clase inversa proporcionaría a los estudiantes una mayor y mejor atención de los docentes que hasta ahora.

Se sabe que para llevar adelante todos estos esfuerzos la experimentación resulta esencial, y que todavía ignoramos el modo de aprovechar al máximo el enorme potencial que la revolución en línea supone para la enseñanza presencial. Por este motivo, cada curso o módulo de HarvardX (una iniciativa de enseñanza informatizada de la Universidad Harvard que incluye la participación en edX) tiene asociado un componente de investigación. Valoramos los progresos del estudiante según la secuencia de los materiales del curso, cómo le fueron proporcionados estos (si consistieron en lecciones o en animaciones de vídeo), si el instructor recurrió a evaluaciones interactivas, así como otros parámetros. Esta investigación complementaria servirá de base para mejoras didácticas, tanto en línea como presenciales. De hecho, las instituciones de educación superior tienen que implicarse en este proceso de exploración, si aspiran a modelos nuevos y eficaces que amplíen el acceso a contenidos de alta calidad y además potencien las estructuras presenciales existentes en la empresa conjunta de investigación, educación y enseñanza.

***Robert A. Lue** es director de la fundación Richard L. Menschel del Centro Derek Bok para la Enseñanza y el Estudio, director de HarvardX y profesor del departamento de biología molecular y celular en la Universidad Harvard.*

425 millones de dólares

Importe aproximado, en 2012, del capital invertido por emprendedores en nuevas empresas de tecnologías para escuelas de primaria y secundaria de EE.UU.

FUENTE DE DATOS: «THE NMC HORIZON REPORT: 2013 K-12 EDITION», POR L. JOHNSON, S. ADAMS BECKER, M. CUMMINS, V. ESTRADA, A. FREEMAN Y H. LUDGATE. THE NEW MEDIA CONSORTIUM, 2013

ordenador. Tareas sencillas, como poner en marcha un programa, cerrarlo, e incluso teclear, les resultan complicadas.»

El primer docente en sumarse a Kepler ha sido Christina Yarng, antigua profesora de una escuela *charter* (en EE.UU., escuela con financiación pública que goza de una elevada autonomía) en Austin, que participa en el Programa Conocimiento es Poder. Emma Stellman, cofundadora de una prestigiosa *charter* en Cambridge (Massachusetts) está diseñando el currículo. Ambas trabajan sin salario, en un remoto rincón del globo, convencidas de que la enseñanza de calidad puede transformar la vida de modo impresionante, y porque les gustan el reto y la aventura. Stellman aspira a utilizar fragmentos de diversos MOOC y combinarlos para que se adapten a sus estudiantes ruandeses. Su programa haría hincapié en la forma de aprendizaje (especialmente, en un contexto computarizado), el análisis cuantitativo y el pensamiento crítico. «Los patronos buscan personas capaces de pensar por sí mismas», afirma Stellman. «Y los estudiantes se enorgullecen cuando ven que pueden tener ideas propias.»

El curso piloto de Kepler tuvo la finalidad de identificar los problemas, y buscarles solución, antes de arrancar el programa completo en otoño. Al cabo de cinco semanas, Yarng y Stellman habían aprendido varias lecciones importantes. Para empezar, necesitaban mejorar el acceso a Internet, por lo que este verano planean mudarse a nuevas oficinas, conectadas a la red de fibra óptica ruandesa. Comprendieron también que numerosos estudiantes necesitan una buena preparación en inglés para poder seguir lecciones en línea y analizar materias complejas del curso. (En años recientes, Ruanda ha cambiado del francés al inglés como lengua principal en las escuelas.) En la actualidad, Kepler prevé llevar a cabo clases intensivas de inglés durante un período de orientación antes de que comiencen las sesiones de otoño, además de asignar numerosos trabajos escritos en ese idioma durante el curso.

De modo ideal, Hodari desearía extender el programa Kepler en Ruanda y exportar después el modelo a otros países. Dependerá, sin embargo, de los resultados que se obtengan los próximos dos años. «Se trata de un ensayo preliminar. Hay mucho entusiasmo en cambiar el mundo, pero la experiencia para hacerlo escasea. Queremos dedicar dos años a poner a prueba el modelo y ver qué métodos pedagógicos ofrecen los mejores resultados». Hodari, por encima de todo, desea que el experimento Kepler tenga éxito, aunque solo sea porque 50 estudiantes ruandeses rebosantes de entusiasmo no cuentan con otra opción de futuro.

***Jeffrey Bartholet** es corresponsal internacional y exdirector de la revista* Newsweek *en Washington.*

ANÁLISIS

LUCES Y SOMBRAS DE LOS MOOC

Los nuevos cursos virtuales masivos prometen revolucionar la enseñanza superior. Sin embargo, poco añaden al ya consolidado modelo de formación flexible que ofrece la educación en línea

Albert Sangrà Morer

Los cursos en línea masivos y abiertos (MOOC) han desembarcado con fuerza desde el continente americano y han creado una sensación simultánea de entusiasmo e inquietud en buena parte de la comunidad universitaria española.

Para conocer a sus verdaderos creadores tenemos que retrotraernos al año 2008 en Canadá, donde G. Siemens, de la Universidad de Athabasca, S. Downes, del Consejo de Investigación Nacional, y D. Cormier, de la Universidad de la Isla del Príncipe Eduardo, desarrollaron el primer MOOC como una apuesta por poner en práctica su teoría pedagógica del conectivismo. Pero, en realidad, el descomunal esfuerzo mediático realizado para lanzar los primeros cursos de las empresas estadounidenses Coursera, Udacity y EdX ha sido el que ha puesto los MOOC en primera línea de los medios especializados y les ha dado voz en aquellos más generalistas.

Todo ello ha creado un contexto en el que el estado de opinión sobre este movimiento se halla notablemente condicionado. No cabe duda, sin embargo, que se hace difícil no compartir los eslóganes que se están utilizando. La enseñanza superior se está encareciendo por momentos —en especial, en los Estados Unidos, de ahí la procedencia del fenómeno—, y la educación en línea puede facilitar el acceso a los estudios universitarios a muchísimas más personas de lo que pueden hacer los campus presenciales. Por otro lado, la formación en línea llega a lugares remotos, donde la educación superior representa la única posibilidad de desarrollo para numerosos jóvenes y para los territorios donde estos habitan. Si, además, el aprendizaje en línea en forma de MOOC resulta gratuito para esas personas, los argumentos son irrebatibles.

TIPOS Y FUNDAMENTOS DE LOS MOOC

Existen, sin embargo, varios tipos de MOOC, basados cada uno en distintos modelos didácticos. Hablaremos aquí de los cMOOC, o conectivistas, y de los xMOOC, más cercanos al modelo tradicional de educación. Los primeros consideran que el elemento básico para que se genere aprendizaje y, por extensión, conocimiento, es la conexión entre las personas que participan. Esta será posible gracias a la facilidad que la tecnología nos aporta (en línea); sobre todo, y de ahí su voluntad de que sean masivos, cuanta más gente esté conectada, con mayor probabilidad se producirá conocimiento nuevo y se llevará a cabo el aprendizaje. Los cMOOC utilizan medios tecnológicos diversos, entre los que destacan los que permiten la agregación de recursos, la interacción y la colaboración entre iguales. Los principios pedagógicos subyacentes son los del constructivismo social y el conectivismo.

Los segundos, los xMOOC, carecen de un razonamiento tan elaborado. Simplemente replican un modelo transmisor de educación, donde el profesor ofrece contenidos de manera unidireccional y los participantes discuten y se ayudan entre sí para conseguir avanzar en el aprendizaje, que será valorado mediante procesos de evaluación tradicionales. El gran cambio que aportan estos cursos radica en la posibilidad de realizar todo el proceso sin el concurso permanente de un profesor y con el empleo de una tecnología distinta a la de la clase tradicional. Los xMOOC se caracterizan por el uso de lecciones grabadas en vídeo, la propuesta de actividades de autoaprendizaje y la evaluación mediante tests automatizados. Se basan en principios pedagógicos fundamentalmente conductistas.

En general, cualquier tipo de MOOC pone énfasis en uno de estos tres aspectos: la red de iguales, el contenido o las tareas. Sea como sea, el análisis de la experiencia de los participantes en distintos MOOC pone de relieve una serie de recomendaciones para tener en cuenta en la elaboración de futuros cursos. Entre ellas, cabe destacar: incorporar un diseño rico y basado en competencias, donde las situaciones contextualicen bien la experiencia de aprender; ligado a lo anterior, emplear metodologías basadas en problemas, casos, proyectos y simulaciones que ayuden a personalizar al máximo el aprendizaje; planificar la interacción e introducir mecanismos que la promuevan (la base del éxito es el aprendizaje colaborativo); gestionar la masa de estudiantes a partir de la creación de comunidades o grupos unidos por el interés, que garanticen la interacción y la creación de red (y que no se reduzca a un mero deseo teórico); establecer claramente el nivel inicial necesario para avanzar (algunos cursos son demasiado básicos, otros enormemente complicados); diversificar los métodos didácticos (a menudo los participantes se quejan del exceso de clases en vídeo unidireccionales); capacitar y promover en los alumnos el papel de iguales, esto es, que ayuden a aprender y que se conviertan también en evaluadores (muchos se quejan del bajo nivel de los compañeros o de la nula validez práctica de sus coevaluaciones); y, por último, determinar y apostar por la función que debe desempeñar el docente como valor añadido fundamental del curso.

Los dos últimos puntos mencionados cobrarán con toda probabilidad una especial dimensión en los próximos años. Por un lado, los métodos de evaluación alternativos a los tradicionales deben aportar mucha más información sobre el proceso de aprendizaje real de los participantes. Y no me estoy refiriendo a más tests automatizados, sino a métodos más cualitativos, que permitan saber, tanto al docente como al estudiante, lo que de verdad se aprende y lo que no. Por otro, se necesita la participación de los docentes, con un rol distinto pero activo. Deben convertirse en nodos de las redes que se van tejiendo y sobre las que reposan las conexiones que expanden las posibilidades de aprender más y mejor. Sin embargo, estos dos aspectos clave para garantizar la calidad del aprendizaje, evaluación y rol del docente, encarecerán sin duda el coste de los MOOC.

¿HERRAMIENTA O MODELO?

Llegados a este punto, cabe remarcar que la educación en línea ya lleva dos décadas contribuyendo a ofrecer educación superior de calidad a personas que por diversos motivos necesitan un modelo de formación más flexible, que se adapte mejor a sus necesidades, disponibilidad de tiempo y posibilidades de desplazamiento.

Al referirnos a los MOOC, estamos hablando, por tanto, de una dimensión económica. Se trata, supuestamente, de mantener la esencia de este tipo de formación, pero de ofrecerla a coste cero a los usuarios. Aunque no exactamente a coste cero. Porque si se pretende que posea algún valor de cambio en el mercado, se tendrá que pagar por sus acreditaciones a aquellas empresas u organizaciones que gestionen dichas certificaciones.

En realidad, lo que se está intentando, a través de la presión que ejercen los *lobbies* empresariales, es reducir los ingresos que reciben las universidades, que deben servir para promover la investigación y crear nuevo conocimiento, y destinar parte de ellos a empresas que van a comerciar con certificados.

Si de verdad queremos que la enseñanza llegue a los rincones más recónditos de nuestro planeta, deberíamos invertir el dinero que está generando el fenómeno de los MOOC en abaratar y financiar la educación en línea de calidad que ya existe. Una educación que, en la mayoría de los casos, ya ha demostrado que da lugar a mejores resultados, permite una mejor adaptación cultural a la medida de cada contexto y de cada persona, y contribuye a la formación de un número ingente de personas que podrán participar en el desarrollo de sus propios países y territorios.



NUMEROSOS ESTUDIANTES que optan por la educación en línea utilizan los MOOC como una herramienta más.

La educación en línea no es una herramienta. Es un modelo de formación que, bien diseñado, alcanza excelentes resultados y que, si así se desea, puede combinarse en modelos híbridos con la educación presencial para beneficio de ambas. Sin embargo, los MOOC sí se asemejan más a una herramienta, a un recurso, como ya han puesto de manifiesto algunos docentes e investigadores. Así, K. Devlin, profesor de Stanford, a partir de su propia experiencia considera que los estudiantes usan los MOOC como un recurso más y no como un verdadero curso.

Lo que en realidad encierra un enorme potencial son los recursos educativos abiertos (*open educational resources*, OER). La creación, difusión, modificación y reutilización de este tipo de recursos podría reducir el coste asociado a la elaboración de contenidos. El problema radica en que no se ha hallado una forma de cuantificar en términos monetarios ese concepto; de ahí que la agregación de distintos OER en un MOOC resulte mucho más atractiva para aquellos que persiguen un beneficio económico. Quien quiera ver reconocida su participación o su aprendizaje en dicho curso deberá desembolsar una cierta cantidad de dinero.

En estos momentos, en los países de habla hispana la plataforma para lanzar los cursos MOOC es Miríada X, promovida por Telefónica y el Banco de Santander, que aprovecha la red de universidades latinoamericanas que ha generado Universia. Aunque ha empezado más tarde que las citadas al inicio de este artículo, posee un enorme potencial de crecimiento. Pero no debemos olvidar la oferta de educación superior en línea que, sin ser MOOC, proviene de las universidades con experiencia en este campo, como la UOC, la UNED, UDIMA o UNIR. Igualmente, cabe destacar distintas iniciativas en el ámbito latinoamericano, entre ellos el proyecto OportUnidad, financiado por la Comisión Europea, en el que participan nueve instituciones europeas y americanas, y que tiene como objetivo fortalecer y sostener el espacio común de la educación superior de América Latina y la Unión Europea a través del incremento en el uso de recursos educativos abiertos.

***Albert Sangrà Morer** es director del eLearn Center, de la Universidad Abierta de Cataluña (UOC).*

TECNOLOGÍA

ENSEÑANZA ADAPTATIVA

Escuelas y universidades están incorporando medios técnicos que confeccionan contenidos a la medida del alumno y libran a los profesores de las clases presenciales. ¿Es para mejor?

Seth Fletcher

El pasado otoño, cuando Arnecia Hawkins se matriculó en la Universidad de Arizona, no era consciente de que iba a participar en un experimento para remodelar la enseñanza superior en Estados Unidos. Con todo, al final del segundo semestre aún continúa aprendiendo matemáticas con una máquina. En un aula de informática bien dotada, en el solitario sucedáneo de campus que la universidad tiene en Tempe, ella y una estudiante de segundo año, Jessica, siguen haciendo ejercicios de contabilidad. En la pantalla, un panel de control les permite repasar vídeos, textos, exámenes y resolver problemas al ritmo que ellas se marcan. Mientras trabajan, sus respuestas —así como un torrente de datos que revelan cómo han llegado a ellas— son enviadas a un servidor remoto. Una serie de algoritmos informáticos comparan esas estadísticas con las de decenas de miles de estudiantes. Con ello, intentan indagar qué está aprendiendo Hawkins, qué aspectos le cuestan más, qué debería estudiar a continuación y de qué forma debería hacerlo.

Que un ordenador hiciese las veces de profesor fue todo un cambio para Hawkins: «No voy a mentir, al principio me resultaba un incordio», cuenta. El nuevo método también tomó por sorpresa al responsable de la asignatura. David Heckman, matemático habituado a disertar en clase, tuvo que adoptar el papel del profesor ambulante que atiende a manos alzadas aquí y ayuda a los estudiantes rezagados allá. Al poco tiempo, sin embargo, ambos comenzaron a apreciar algunas ventajas. A Hawkins le gusta avanzar a su ritmo y administrarse con libertad las horas de estudio, ya sea con el ordenador portátil o en el aula de informática. Heckman, por su parte, puede seguir con mayor facilidad el progreso de sus alumnos. Un panel de control le informa con todo detalle sobre la marcha de cada estudiante; no solo sobre quiénes están al día y quiénes no, sino sobre qué concepto está aprendiendo cada uno. Heckman explica que aún prefiere dar clase, pero parece estar adaptándose. Y el método viene con un auténtico regalo para el personal docente: el programa se encarga de casi todo el trabajo de evaluación.

Al final del curso, Hawkins recibirá la que probablemente sea su última clase de matemáticas en la universidad. Y pensará en este método de aprendizaje —ahora tan novedoso y controvertido— como en una experiencia universitaria «normal». «¿Es que tenemos clases normales de matemáticas aquí?», pregunta.

MITCH PAYNE (*fotografía*); KYLE BEAN (*ilustración*)


A B C D

LOS DATOS TOMAN LA EDUCACIÓN

La decisión de la Universidad de Arizona de pasarse a la enseñanza informatizada nació en parte de la necesidad. Con sus 70.000 alumnos matriculados, se trata de la mayor universidad pública de Estados Unidos. Y, al igual que muchas otras instituciones educativas del país, está pasando por una época de cambios violentos. En los últimos cinco años su financiación estatal se ha reducido en un 50 por ciento. Al mismo tiempo, sin embargo, ha aumentado el número de nuevos matriculados, una buena parte de los cuales carece de la formación necesaria para seguir un programa universitario. «Hay un mar de gente a la que ahora estamos intentando educar y que nunca antes nos habíamos encontrado», explica Al Boggess, director del departamento de matemáticas. «Los políticos nos dicen: "Edúquenlos. ¿Recursos? Encuéntrenlos. Y queremos que se gradúen en cuatro años. Ah, y van a tener menos financiación".»

Hace dos años, los responsables de la universidad se propusieron buscar métodos más eficientes para conseguir que los estudiantes superasen algunos requisitos formativos básicos; en especial, algunos cursos que, como los de matemáticas, acaban generando un número desproporcionado de abandonos. A los pocos meses de escuchar una charla de José Ferreira, fundador y director de Knewton, una joven compañía de aprendizaje adaptativo con sede en Nueva York, la Universidad de Arizona dio el gran paso. Aquel mismo otoño, sin apenas debate ni advertencia, colocó a 4700 estudiantes en cursos informatizados de matemáticas. El año pasado, unos 50 profesores tutelaron a 7600 estudiantes en tres cursos introductorios de matemáticas basados en los programas de Knewton. Para el otoño de 2014, la universidad confía poder adaptar seis cursos más, lo que traspasaría otros 19.000 estudiantes al año a las filas de la enseñanza adaptativa.

La Universidad de Arizona ha sido la primera y la que de manera más decidida ha apostado por la enseñanza personalizada guiada por datos. Sin embargo, como respuesta al aumento de las matriculaciones, los recortes presupuestarios y unas condiciones más rigurosas en las titulaciones, varias instituciones educativas de todos los niveles están adoptando opciones similares. Los centros de enseñanza primaria y secundaria de 45 estados de EE.UU., así como el distrito de Columbia, se están apresurando por implantar requisitos más estrictos en lengua, humanidades y matemáticas, por lo que necesitan nuevos materiales y métodos de evaluación. Alrededor de la mitad de los nuevos exámenes serán en línea y adaptativos. Ello significa que un ordenador adecuará las preguntas a las destrezas del estudiante y calculará la nota. Las escuelas están experimentando con un abanico de programas adaptativos de otras clases, desde lecciones de lectura y matemáticas para la escuela primaria hasta «motores de evaluación» que entrenan a los estudiantes de secundaria para aprobar los exámenes Advanced Placement (un programa de acceso a la universidad). Las mismas técnicas están también arraigando en otros países. Para 2015, las pruebas PISA (Programa Internacional para la Evaluación de Estudiantes de la OCDE, que cada tres años se realizan a jóvenes de 15 años en decenas de países) incluirán componentes adaptativos para evaluar ciertas habilidades difíciles de medir, como la resolución de problemas de forma colaborativa.

Los partidarios de la enseñanza adaptativa sostienen que esta permite dar a cada estudiante una instrucción personalizada a un coste aceptable. Gracias a ella, por fin podrá abandonarse el modelo industrial que desde hace doscientos años ha caracterizado a la educación occidental. Por su parte, los críticos oponen que es este nuevo método de enseñanza el que amenaza con convertir las escuelas en cadenas de montaje. Consideran, además, que esta creciente informatización de la enseñanza supone otra concesión más al sector privado, que acabará imponiendo sus productos a profesores y alumnos con el pretexto de la «reforma». Y las tareas supuestamente avanzadas que los ordenadores de hoy apenas pueden llevar a cabo (la evaluación de los estudiantes y la adopción de métodos adecuados para cada uno) son las mismas que los docentes vienen realizando desde hace siglos. En lugar de delegarlas en las computadoras, argumentan los detractores, deberíamos invertir más en la formación, contratación y conservación de buenos maestros.

Y por más que las empresas de enseñanza adaptativa proclamen que solo piensan en el porvenir de los alumnos, no puede decirse que falten oportunidades de negocio. En estos momentos, docenas de ellas compiten por hacerse hueco en un mercado milmillonario. Casi un 20 por ciento del contenido educativo de las escuelas K-12 (nombre que en EE.UU. reciben la educación primaria y secundaria) llega ya por vía informática, explica Adam Newman, socio fundador de la compañía de análisis de mercado Education Growth Advisors. Aunque hoy por hoy los programas adaptativos no suponen más que una pequeña parte de toda la enseñanza informatizada (unos 50 millones de dólares en las escuelas K-12), su cuota podría aumentar pronto. Newman señala que el concepto de adaptabilidad se

Adaptarse o morir

Una muestra de las más de 70 compañías que hoy compiten por controlar el mercado de la enseñanza adaptativa:

CogBooks

Esta compañía escocesa es especialista en informática de formación de personal en grandes empresas en materias como comercio internacional, ventas y comunicación. CogBooks ha anunciado que proyecta entrar en el mercado estadounidense de enseñanza superior.

DreamBox Learning

Con sede en el estado de Washington, DreamBox crea cursos adaptativos en línea de matemáticas, muchos de ellos ajustados a las normas de enseñanza de las materias troncales de la escuela primaria.

Knewton

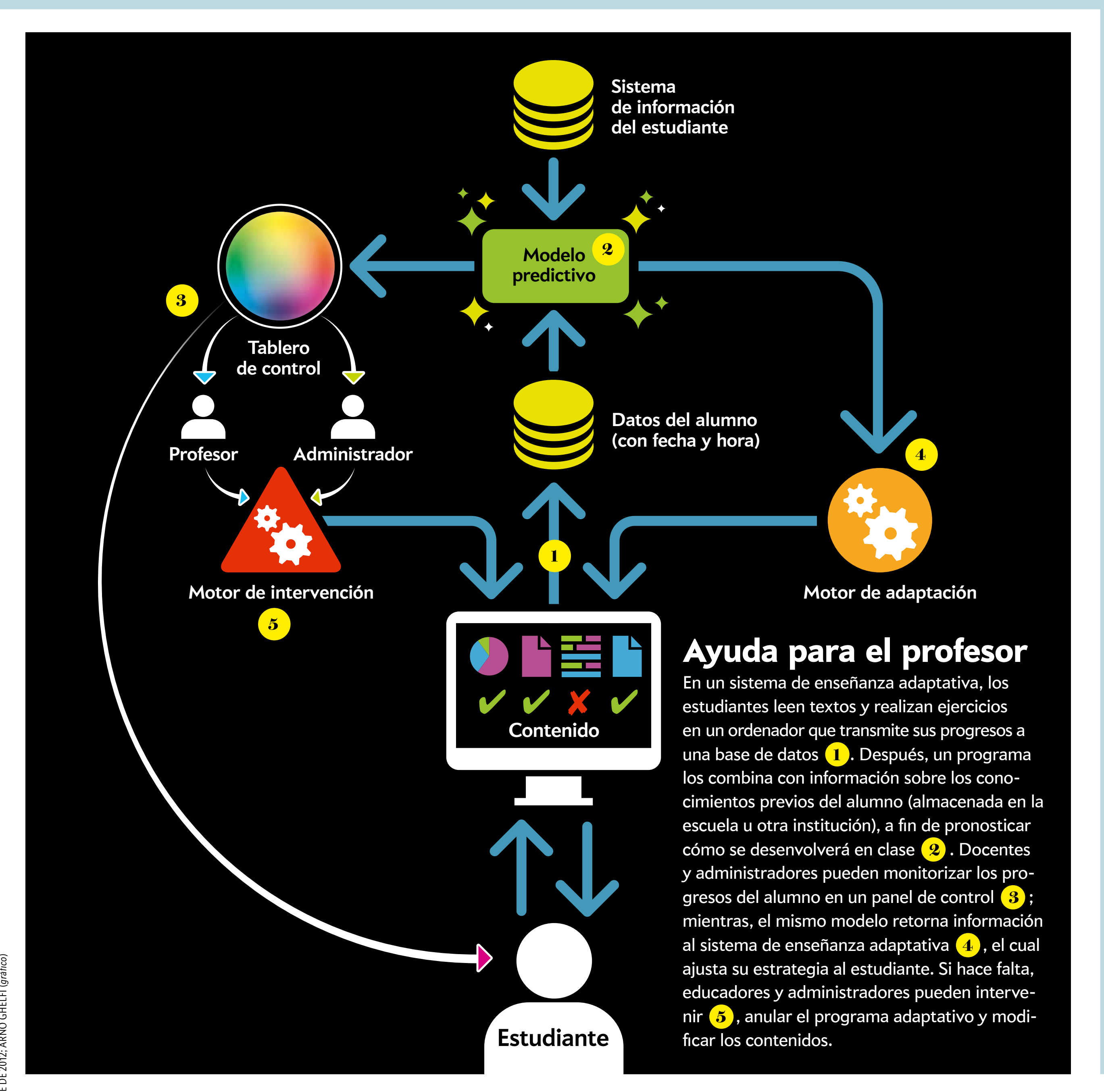
Esta compañía neoyorquina, que ya cuenta cinco años, desarrolla los programas que se emplean en los cursos adaptativos de matemáticas de la Universidad de Arizona. Está creando una plataforma en la que los docentes pueden incorporar sus clases, exámenes, vídeos y otros materiales. [En mayo, Knewton anunció una colaboración con Macmillan Education, empresa perteneciente al mismo grupo editorial que Investigación y Ciencia.]

Area9

La plataforma adaptativa de esta firma danesa da soporte a los programas LearnSmart de McGraw-Hill. Estos proporcionan enseñanza personalizada a estudiantes de enseñanza secundaria, universitarios y profesionales.

PrepU

PrepU ha desarrollado un «motor de evaluación» para ayudar a los alumnos a preparar los exámenes Advanced Placement de acceso a la universidad, así como a los estudiantes universitarios de biología, enfermería y otras carreras. [PrepU es parte de Macmillan New Ventures, empresa perteneciente al mismo grupo editorial que Investigación y Ciencia.]



Ayuda para el profesor

En un sistema de enseñanza adaptativa, los estudiantes leen textos y realizan ejercicios en un ordenador que transmite sus progresos a una base de datos (1). Después, un programa los combina con información sobre los conocimientos previos del alumno (almacenada en la escuela u otra institución), a fin de pronosticar cómo se desenvolverá en clase (2). Docentes y administradores pueden monitorizar los progresos del alumno en un panel de control (3); mientras, el mismo modelo retorna información al sistema de enseñanza adaptativa (4), el cual ajusta su estrategia al estudiante. Si hace falta, educadores y administradores pueden intervenir (5), anular el programa adaptativo y modificar los contenidos.

FUENTE: «ENHANCING TEACHING AND LEARNING THROUGH EDUCATIONAL DATA MINING AND LEARNING ANALYTICS: AN ISSUE BRIEF», OFICINA DE TECNOLOGÍA EDUCATIVA DEL DEPARTAMENTO DE EDUCACIÓN DE EE.UU., OCTUBRE DE 2012; ARNO GHELFI (*gráfico*)

encuentra más arraigado en la enseñanza secundaria que en la superior: «Las escuelas K-12 llevan años poniendo énfasis en la educación personalizada. Aunque sin tecnología, eso ya supone una forma de adaptación», razona.

Los responsables de la enseñanza superior parecen seguir los mismo pasos. Según una encuesta reciente realizada por la empresa Gallup y la publicación *Inside Higher Ed*, un 66 por ciento de los decanos de escuelas universitarias estadounidenses calificaron como prometedoras las técnicas de enseñanza y evaluación adaptativas. La Fundación Bill & Melinda Gates ha lanzado el Programa de Aceleración del Mercado de Enseñanza Adaptativa, el cual concederá diez subvenciones de 100.000 dólares a universidades y escuelas universitarias de EE.UU. para que desarrollen cursos adaptativos de al menos 500 alumnos durante tres semestres. «A largo plazo —unos 20 años—, cabe esperar que casi todos los cursos tengan algún tipo de componente adaptativo», vaticina Peter Stokes, experto en educación digital de la Universidad Noroccidental de Estados Unidos. Según él, ello supondrá una excelente oportunidad para que la enseñanza se beneficie de los estudios empíricos y la ciencia cognitiva de una forma nueva. Sobre todo en la enseñanza superior, explica, son muy pocos los docentes que poseen alguna formación pedagógica: «Hacemos las cosas convencidos de que funcionan. Pero cuando comienzan a efectuarse mediciones científicas, a veces uno se percata de que algunos métodos carecían de base empírica».

LA CIENCIA DE LA ADAPTABILIDAD

En general, el término «adaptativo» se refiere a una interfaz informática que supervisa la manera de razonar del estudiante y que, de modo automático, personaliza el material didáctico. Con todo, no sorprende que las empresas del ramo estén luchando ferozmente por el calificativo. Unos argumentan que un programa que no hace más que elegir la siguiente pregun-



Promesas y riesgos

La tecnología puede inspirar la creatividad o deshumanizar la enseñanza

Diane Ravitch

Para bien o para mal, la tecnología está transformando la enseñanza estadounidense. Lo bueno lo hallamos en los ingeniosos métodos que permiten a los docentes motivar a sus alumnos para que se impliquen en proyectos de ciencias, aprendan historia viendo los acontecimientos por sí mismos o exploren sus propias ideas en Internet. Hay miles de profesores que conocen bien Internet y que intercambian ideas sobre cómo dar vida a las aulas, a fin de que los alumnos estudien y aprendan con más interés.

Lo malo llega bajo una multitud de formas insidiosas.

Una de las manifestaciones perversas de las nuevas tecnologías la vemos en las escuelas a distancia, llamadas a veces academias virtuales. Dedicadas a la enseñanza primaria y secundaria, estas entidades con ánimo de lucro reclutan grandes cantidades de alumnos e invierten cuantiosas sumas de dinero público en publicidad. Suelen cobrar una subvención estatal por cada estudiante, por lo que esos fondos desaparecen de las partidas dedicadas a las escuelas públicas locales. Prometen una enseñanza personalizada, pero no es más que retórica. Sus índices de fracaso escolar resultan muy elevados, y quienes se gradúan lo hacen con notas bajas. En algunas, el índice de abandono alcanza el 50 por ciento. A pesar de todo, mientras sigan atrayendo nuevos estudiantes continuarán dando beneficios a sus propietarios e inversores.

Otro uso poco claro de la tecnología lo tenemos en la corrección de pruebas. Grandes compañías como Pearson y McGraw-Hill están utilizando métodos informáticos para calificar exámenes manuscritos. Las máquinas pueden realizar esa tarea con mayor rapidez que un profesor, pero no pueden valorar asertos fácticos ni el uso imaginativo del lenguaje. Un estudiante podría escribir que la Segunda Guerra Mundial empezó en 1839 y el autómata no se lo rebatiría. Los estudiantes aprenderán enseguida a escribir según las recetas preferidas por la máquina a costa de la exactitud, la creatividad y la imaginación. Peor todavía, los docentes abandonarán la importante tarea de leer lo que escriben sus alumnos, por lo que estarán

ta en función de si se ha acertado o no la anterior no puede, en 2013, arrogarse el título de adaptativo. Según ese punto de vista, la adaptabilidad requeriría crear un perfil psicométrico del usuario, así como realizar ajustes continuos basados en los progresos del estudiante.

Para ello, los diseñadores de programas de enseñanza adaptativa deben trazar todas las posibles conexiones entre los conceptos que componen una unidad de material didáctico. Después, cada vez que un estudiante mire un vídeo, lea una explicación, resuelva un ejercicio o se enfrente a un examen, los datos relativos a su rendimiento o a la eficacia del contenido, entre otros, se transmiten a un servidor. Por último, entrarán en acción los algoritmos informáticos encargados de comparar al estudiante en cuestión con otros miles o incluso millones. De ahí emergen varias pautas. Tal vez el estudiante haya topado con las mismas dificultades que quienes comparten su mismo perfil psicométrico. En tal caso, el sistema sabrá cómo proceder para solucionar el problema y ajustará el material en consecuencia. Con miles de millones de datos sobre millones de estudiantes, y si se posee una experiencia y potencia de cálculo suficientes, dichos algoritmos deberían ser capaces de efectuar toda clase de pronósticos. Quizás hasta el punto de informarle de que la mejor hora para aprender las potencias es entre las 9:42 y las 10:30 de la mañana.

Esos algoritmos también deberían predecir la mejor forma de que un estudiante recuerde el material que está aprendiendo. Ulrik Juul Christensen, director de Area9, la empresa que ha desarrollado los programas de análisis de datos de los productos adaptativos LearnSmart de McGraw-Hill, hace hincapié en que su compañía utiliza el concepto de «degradación del recuerdo». Más de dos millones de estudiantes emplean en la actualidad los programas adaptativos LearnSmart en docenas de temas, ya sea por iniciativa propia o como parte de un curso. Varias investigaciones han puesto de manifiesto que una persona recuerda mejor una palabra o un dato si, tras haberlo aprendido por primera vez, lo repasa justo en el momento en que está a punto de olvidarlo. Los programas de Area9 se valen de algoritmos que les permiten deducir cuál es la curva de degradación del recuerdo de cada individuo. Gracias a ello, pueden recordar a un estudiante un concepto aprendido hacía una semana y que, en ese momento, estaba a punto de desaparecer para siempre de su memoria.

Pocos maestros humanos pueden presumir de esa especie de premonición. No obstante, Christensen desecha la idea de que los ordenadores vayan a reemplazar a los maestros: «No creo que seamos tan estúpidos para dejar que los ordenadores se encarguen por completo de la enseñanza de nuestros hijos».

CONTRAOFENSIVA

El pasado mes de marzo, Gerald J. Conti, profesor de formación cívica en el instituto de enseñanza secundaria Westhill, en Siracusa, colgó en su página de Facebook una acerada carta de jubilación que pronto corrió como la pólvora: «En su ansia de dólares de impuestos federales, nuestros legisladores han fallado al enviar a nuestros niños a industrias privadas como Pearson Education [una gran editorial educativa que acaba de asociarse con Knewton]. Mi profesión se ha visto degradada por una atmósfera ubicua de desconfianza, según la cual no puede permitirse que los docentes desarrollen y administren sus propios exámenes y pruebas, ahora denominados genéricamente “evaluaciones”, ni que califiquen los exámenes de sus propios alumnos». Conti no cree que las grandes cantidades de datos vayan a conducir a una enseñanza personalizada, sino más bien a

menos informados sobre su manera de pensar. Ello supone una pérdida de calidad en la educación. Este constituye un problema general de toda evaluación en línea, ya que las labores de corrección del profesor se transfieren a una compañía lejana. En la última convocatoria de evaluaciones estatales se produjeron caídas del sistema informático en varios estados. Además, es solo cuestión de tiempo que los piratas informáticos se hagan con los exámenes.

Con todo, el uso más preocupante de la tecnología es el acopio de datos confidenciales de los estudiantes del sistema público. La Fundación Bill & Melinda Gates ha donado cerca de 100 millones de dólares para crear Shared Learning Collaborative, ahora llamada inBloom, con socios como Wireless Generation (propiedad de News Corporation, de Rupert Murdoch) y Carnegie Corporation. InBloom recopilará datos de estudiantes de diversos distritos y estados (algunos de ellos están reconsiderándolo debido a las protestas de los padres). Los datos serán almacenados en una nube informática gestionada por Amazon en la que constarán los nombres de los estudiantes, su dirección, su curso académico, grado de minusvalía, asistencia a clase, participación en programas, así como otros muchos detalles que ni a docentes ni a escuelas les está permitido divulgar.

¿Quién necesita toda esa información personal? ¿Por qué se comparte? Sus partidarios sostienen que se trata de crear mejores productos para cada estudiante. Los críticos objetan que la información será dada o vendida a empresas que la usarán para comercializar productos dirigidos a niños y padres. Nadie sabe si los datos estarán a salvo. Sabemos que un curioso puede acceder con facilidad a una nube informática.

Hasta hace poco, la entrega de datos personales de estudiantes sin consentimiento paterno estaba prohibida en EE.UU. por la ley federal FERPA (protección de derechos y de privacidad educativa de la familia). En 2011, el Departamento de Educación la revisó y dio luz verde al proyecto. El Centro de Privacidad de Información Electrónica (EPIC) ha demandado al Departamento de Educación por modificar la ley FERPA y permitir la entrega de datos de estudiantes a terceros sin consentimiento paterno.

He aquí la cuestión: los docentes ven la tecnología como un instrumento inspirador de la enseñanza; los empresarios, como un medio para estandarizar la educación, reemplazar a los docentes por máquinas, comercializar nuevos productos y obtener beneficios. ¿Qué visión prevalecerá?

Diane Ravitch *es historiadora de la enseñanza en EE.UU. e investigadora de la educación en la Universidad de Nueva York. Su libro más reciente es* The death and life of the great American education system: How testing and choice are undermining education.

un monocultivo educativo: «Las STEM [ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas] son las reinas, y la enseñanza “guiada por datos” solamente busca conformismo, estandarización, exámenes y una adherencia zombi al somero y genérico Núcleo Común [de materias troncales]».

La carta de Conti constituye un buen ejemplo del rechazo creciente hacia las reformas educativas de corte tecnológico y basadas en aprobar exámenes. En enero, el profesorado del instituto de enseñanza secundaria Garfield, en Seattle, acordó boicotear la prueba MAP (administrada en los distritos escolares de EE.UU. para medir el rendimiento de los estudiantes). Tras un conflicto con el superintendente y la dirección del instituto, los docentes mantuvieron su boicot, que no tardó en propagarse a otras escuelas de Seattle. En Chicago y otros lugares hubo protestas de profesores en muestra de solidaridad. A mediados de mayo se anunció que a las escuelas de secundaria de Seattle se les permitiría no participar en la prueba, siempre que la sustituyeran por alguna otra evaluación.

A los proponentes del aprendizaje guiado por datos les resultaría fácil acallar esas protestas si pudieran demostrar que sus métodos funcionan mejor que los tradicionales. Pero no pueden, al menos por ahora. Las pruebas empíricas sobre su efectividad son «preliminares e impresionistas», como ha escrito Darrell M. West, partidario de la tecnología de enseñanza adaptativa y fundador del Centro para la Innovación Tecnológica de la Institución Brookings. Cualquier evaluación rigurosa de las nuevas técnicas tendría que aislar y considerar numerosas variables, como el aumento o la reducción del número de alumnos por aula, la práctica de clases «invertidas» (cuando las tareas se hacen en la escuela y las lecciones se imparten por vídeo), si el material se presenta con vídeos, textos o juegos, etcétera. La Universidad de Arizona señala que un 78 por ciento de los estudiantes que siguieron el curso de matemáticas con los programas de Knewton lo aprobaron, frente a un 56 por ciento del curso anterior. Sin embargo, puede que el número de aprobados haya aumentado no gracias a la tecnología, sino debido a un cambio en la política de la universidad: ahora, los alumnos pueden repetir el curso de matemáticas o alargarlo a dos semestres sin tener que pagar doble matrícula.

Por último, aunque los partidarios de la tecnología adaptativa lograsen demostrar que funciona, aún habrían de vérselas con las cuestiones de privacidad. No son pocos quienes encuentran inquietante la recopilación generalizada de datos psicométricos de los estudiantes. De ello da fe el gran revuelo que este mismo año provocó la compañía inBloom. En esencia, esta ofrece un almacén digital de datos escolares (nombres, direcciones, números de teléfono, calificaciones, datos sanitarios, etcétera) en un formato que puede ser usado por aplicaciones de carácter educativo creadas por terceros. Cuando la empresa lanzó su oferta el pasado mes de febrero, anunció varios acuerdos con los distritos escolares de nueve estados. Los padres montaron en cólera. Se extendió el temor a una «base nacional» de datos de alumnos y

80%

Porcentaje aproximado de aplicaciones educativas orientadas a niños en EE.UU. Este año fueron las segundas que más descargas experimentaron después de iTunes.

FUENTE: «THE NMC HORIZON REPORT: 2013 K-12 EDITION», POR L. JOHNSON, S. ADAMS BECKER, M. CUMMINS, V. ESTRADA, A. FREEMAN Y H. LUDGATE. THE NEW MEDIA CONSORTIUM, 2013

se acusó a los distritos escolares de estar entregando información confidencial a compañías que, después, acabarían usándola para proponer soluciones a problemas inexistentes. Desde entonces, seis de esos nueve estados se han echado atrás.

Lo anterior puede parecer una reacción exagerada, pero los defensores de la enseñanza adaptativa ya hablan de la posibilidad de que el perfil informático de un estudiante lo persiga durante toda su carrera educativa o incluso más allá. En otoño del año pasado, la campaña de reforma educativa Digital Learning Now publicó un artículo que proponía la creación de «mochilas de datos» para niños en edad preescolar. Se trataría de transcripciones electrónicas que los pequeños portarían consigo curso tras curso para que, desde el primer día de escuela, pudieran presentarse con los «datos sobre sus asignaturas preferidas, motivaciones, logros personales y un registro más completo de sus progresos a lo largo del tiempo». Llegado el momento de solicitar el ingreso en una universidad o de buscar empleo, ¿por qué no utilizar las calificaciones registradas en sus mochilas de datos a modo de credenciales? Algo similar ocurre ya en Japón, donde es frecuente que los directivos que han estudiado inglés con el programa de enseñanza adaptativa iKnow hagan constar dichas calificaciones en sus currículums.

ESTO NO ES UN EXAMEN

No está nada claro que la preocupación de las familias o el enojo de los docentes baste para evitar que la tecnología de análisis de datos penetre en el sistema educativo. «La realidad es que va a ocurrir», asegura Eva Baker, directora del Centro para el Estudio de la Evaluación de la Universidad de California en Los Ángeles. «Y no será algo menor. Será algo grande. En parte, sucederá porque su coste resultará menor que el de formar profesionales.»

Eso no quiere decir que los profesores vayan a desaparecer. Ni tampoco que las escuelas vayan a obsesionarse con una cultura basada en aprobar exámenes. Podría significar lo contrario. Un sistema de pruebas lo suficientemente avanzadas resultaría indistinguible de la instrucción. En una clase plenamente adaptativa, los estudiantes serían evaluados de forma continua. Cada golpe de tecla y cada clic del ratón iría alimentando el perfil del alumno. Y los exámenes en los que un estudiante se lo juega todo podrían desaparecer en favor de una supervisión perpetua.

Pero, mucho antes de que eso ocurra, el relevo generacional tal vez provoque que los mismos métodos informáticos que hoy nos resultan tan ajenos pasen desapercibidos dentro de poco, como ya le ha ocurrido a Hawkins. Y tal vez los docentes también se lo replanteen. Así lo cree Phil Regier, vicerrector de la Universidad de Arizona: «Creo que una amplia mayoría de los profesores convendrán en que se trata de un cambio positivo. Y por cierto, dentro de tres años, el 80 por ciento de ellos no conocerá otra cosa».

Seth Fletcher *es redactor de* Scientific American.



La educación de Angry Birds

Lo que puede enseñarnos el videojuego más adictivo del mundo

Peter Vesterbacka

Son muchos los que piensan que estudiar debería parecerse a trabajar. A menudo, cuando una familia procedente de otro país llega a Finlandia y lleva a sus hijos a preescolar, temen que no se les esté enseñando lo suficiente: «Los chicos no aprenden nada. No hacen más que jugar», dicen. Ahí está la clave. Las personas aprendemos jugando. Esta premisa forma parte integral del sistema educativo finlandés. Mis hijos tienen una jornada escolar corta y traen pocos deberes a casa. Sin embargo, los estudiantes finlandeses obtienen algunas de las puntuaciones más altas en las pruebas de evaluación internacionales.

¿Qué pueden enseñarnos los juegos? En Finlandia disponemos de un ejemplo muy claro. Se ha observado que los chicos hablan inglés mejor que las chicas. La razón, documentada por varios estudios, se halla en que los varones dedican más tiempo a los videojuegos. Y, dado que suelen estar en inglés, adquieren más vocabulario. Lo principal es que, aunque los chicos no se propusieron estudiar inglés, lo aprendieron al mismo tiempo que lo pasaban bien.

Nunca nos hemos visto como una compañía que solo hace juegos. Estamos trabajando cada vez más en proyectos educativos. El año pasado, junto con la NASA, lanzamos Angry Birds Space, que enseña a los niños sobre microgravedad. También estamos colaborando con el CERN para desarrollar juegos y animaciones que enseñen nociones de física cuántica a niños de apenas cuatro o seis años. De hecho, Angry Birds ya contiene física: el jugador puede aprender sobre trayectorias aun sin prestarles demasiada atención. Con el CERN estamos adoptando un enfoque similar, aunque llevándolo un poco más allá para profundizar de un modo ameno en matemáticas, física y ciencias en general. Por último, también nos estamos orientando hacia los idiomas. Hemos desarrollado un juego para aprender inglés destinado al mercado chino, basado en el Festival de la Luna.

No creo que la enseñanza del futuro se base solo en la informática. Los niños deben trabajar con objetos que puedan tocar y sentir. Creo que, dentro de pocos años, más de la mitad de nuestro negocio se basará en productos con soporte físico. Ya tenemos un pujante sector editorial, con libros de cuentos y actividades basados en los personajes de nuestros videojuegos, y estamos trabajando en una línea de juguetes educativos. Hasta ahora, los intentos por combinar lo material y lo virtual han sido muy limitados. Creo que se trata de un sector con grandes oportunidades y que en los años venideros se beneficiará de una tremenda innovación.

Peter Vesterbacka *es jefe de ventas de Rovio Entertainment, la compañía finlandesa creadora del videojuego Angry Birds.*

PEDAGOGÍA

ENSEÑAR Y APRENDER EN ENTORNOS DIGITALES

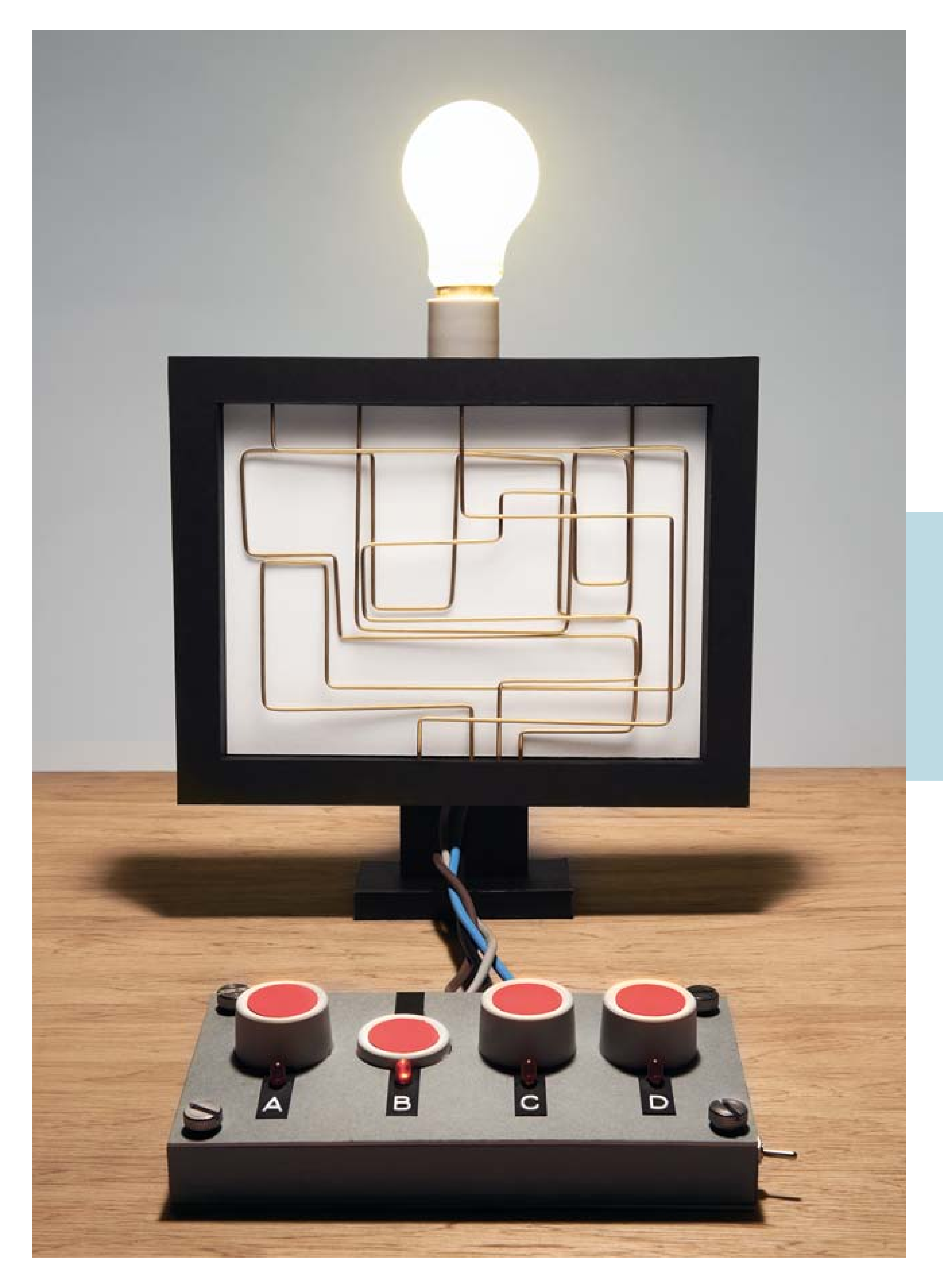
Pasado, presente y futuro de los modelos educativos en red

José Luis Rodríguez Illera

A diferencia de otros campos de investigación, en el de la educación no pueden plasmarse de manera objetiva todos los aspectos que lo integran. Solo los más cuantitativos: niveles de escolarización, fracaso escolar (medido en resultados) o grado de analfabetismo en distintos países, por poner algunos ejemplos. En el fenómeno educativo participan muchos otros elementos, más complejos, o más subjetivos si se quiere, que resultan difíciles de desentrañar, puesto que no pueden desligarse de los intereses y las pertinencias de quien lleva a cabo el análisis.

Lo mismo ocurre con la educación digital, se produzca esta en entornos totalmente digitales o mediante la combinación de situaciones presenciales y otras virtuales. A la dificultad de definir con precisión el fenómeno en estudio (¿a qué nos referimos exactamente cuando hablamos de «educación digital»?), se añade la de obtener una valoración ecuánime del mismo. Pese a la dificultad de evaluar la calidad de este nuevo escenario educativo, intentaremos ofrecer un «mapa» que muestre sus aspectos fuertes y algunos de sus claroscuros, que también los tiene.

Las consecuencias de la sociedad digital sobre la educación —entendida en sentido amplio y no solo como educación formal o escolar—, pueden dividirse en dos grandes grupos. En primer lugar, los cambios que está provocando en las modalidades educativas tradicionales, desde la enseñanza a distancia, el *e-learning*, los cursos mixtos, o las maneras de buscar información y formarse en red. En segundo lugar, las transformaciones que afectan a la casi totalidad de la población que utiliza herramientas digitales, sea con propósitos educativos o no (nos referimos a la evolución de las formas básicas y avanzadas de alfabetización digital, debida al dominio de nuevos códigos y lenguajes; al manejo de aplicaciones complejas, de nuevos dispositivos y herramientas; y a las nuevas prácticas). Nos centraremos aquí únicamente en el primer



MITCH PAYNE (*fotografía*); KYLE BEAN (*ilustración*)

grupo de cambios mencionados, los que más habitualmente se identifican con la educación virtual.

DEL CORREO POSTAL A INTERNET

La expresión *e-learning* (aprendizaje electrónico) concentra muchas de las ideas que acabamos de mencionar sobre la transformación que han sufrido las formas de enseñar y aprender. Aunque algunos de los cambios provienen de los primeros usos de la enseñanza mediada por ordenador, en lenta progresión desde hace ya unos 40 años, el más radical viene dado sin duda por la existencia de Internet, la ubicación en páginas web y bases de datos de gran parte de nuestros conocimientos (externalización) y la facilidad de acceso a los mismos, no limitado por constricciones espaciales o temporales. Sin embargo, estas facilidades y mejoras digitales relacionadas con los contenidos no han tenido las mismas consecuencias sobre la didáctica y la educación en general. Pues si bien es cierto que se ha producido una expansión de estas modalidades «a distancia» y digitales a casi todos los ámbitos educativos, no está claro que estas formas sean de calidad y adecuadas para sus propósitos.

La educación virtual, o digital, o en red —sin entrar en matices terminológicos—, se ha desarrollado en tres ámbitos de manera desigual. Por un lado, el que proviene de la formación corporativa, o de empresa, que ya adoptó formas previas de enseñanza asistida por ordenador, como se había denominado. Por otro, la formación continuada, o de reciclaje, o post-obligatoria, en el sentido de ser complementaria a la ya recibida en el ámbito escolar y que cuenta con una amplia aplicación en numerosos países, aunque no tanto en España. Y por último, la formación universitaria mediante las universidades no presenciales como la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), la Universidad Abierta de Cataluña (UOC), la Universidad Abierta inglesa (OU) u otros equivalentes en otros países, así como mediante cursos virtuales impartidos de manera complementaria por las universidades presenciales; estas últimas modalidades se extienden lentamente también a la educación secundaria. Los tres ámbitos (empresa, formación continuada y universidad) heredan, y cambian, el ambiguo legado de la educación a distancia, la que se inició como formación por correspondencia hacia mediados del siglo XIX y que solo ha alcanzado su plenitud, por el momento, con las actuales tecnologías interactivas.

En estos últimos diez años, la tecnología y su impacto social han ido muy por delante de los modelos pedagógicos imperantes, que se han considerado poco adecuados para una realidad tan cambiante.

Muchos estudios han valorado el alcance y la extensión del *e-learning* en estos ámbitos, si bien siempre con algunas dificultades para obtener datos exactos. Los Estudios Generales de Medios, que llevan haciéndose más de una década, se refieren a pautas de acceso y de consumo, así como a dispositivos utilizados; las encuestas sobre aprendizaje electrónico, en cambio, deben ser contestadas por los responsables de formación y, en ciertos casos, por los usuarios finales, lo que dificulta que la muestra de participantes sea representativa (de tamaño suficiente). Con todo, los datos disponibles muestran un aumento progresivo del alcance de esta modalidad educativa.

En 2012 se presentó el primer eurobarómetro sobre el uso del aprendizaje electrónico como medio de formación en empresas, coordinado por la compañía CrossKnowledge y realizado en seis países (Francia, Reino Unido, España, Italia, Bélgica y Países Bajos). Según se desprende del estudio, la mitad de las empresas llevan más de tres años ofreciendo estos servicios y el resto los han incorporado hace menos de tres años. Algunos resultados varían de un país a otro: en España, más de un 40 por ciento de las empresas de gran tamaño han utilizado alguna forma de *e-learning* para formar a sus empleados; en otros países, el porcentaje apenas llega al 17.

También en el sector universitario se han observado resultados positivos. Con todo, reflejan un uso de los entornos *e-learning* o *b-learning* (de *blended*, «híbrido» o «mixto», es decir, aprendizaje que combina la interacción presencial y la virtual) más centrado en aspectos informativos y de depósito de lecturas; las metodologías didácticas más complejas (uso de simulaciones o enfoques basados en resolución de problemas) son todavía minoritarios. Cristóbal Ballesteros, de la Universidad de Sevilla, y sus colaboradores analizaron en 2010 el uso del *e-learning* en las universidades andaluzas: observaron que la aplicación de entornos virtuales de aprendizaje por parte del profesorado era todavía limitada (basada mayoritariamente en textos y lecturas), lo mismo que su formación específica para sacar provecho de las funcionalidades del *e-learning*. Las universidades han dedicado y dedican un gran esfuerzo a esta formación, pero el cambio de cultura didáctica de los docentes se está produciendo a un ritmo lento.

Sin duda, el uso de las tecnologías en estos ámbitos muestra también cómo este se va ampliando rápidamente hacia nuevas plataformas, como los teléfonos móviles inteligentes y las tabletas, configurando un nuevo espectro de aplicaciones o *m-learning* (de *mobile*, es decir, aprendizaje móvil o ubicuo). Numerosos informes y proyectos exploran esta nueva realidad (como los de la Fundación Telefónica), la adaptación de los usuarios y de los nuevos usuarios jóvenes, y las consecuencias que esta tendrá para la educación, incluida la reglada, que se ve de alguna manera «invadida» por la presencia de dispositivos electrónicos personales en las aulas (desde lectores de música en formato mp3 hasta libros electrónicos o los mencionados teléfonos y tabletas).

HISTORIA Y EVOLUCIÓN

También podemos ahondar en la comprensión de la educación digital a partir de las etapas o los momentos que esta ha ido atravesando en su corta pero rápida historia de apenas treinta o cuarenta años. Son más bien momentos determinados por la evolución de las tecnologías —muchas de las cuales aparecen y desaparecen, como la cinta de vídeo, los CD-ROM, por no hablar del videodisco o del CD-I, entre otras— y también por la concepción pedagógica sobre el uso educativo de las mismas. En relación a estas concepciones, los docentes siempre han compartido un cierto optimismo «mágico» hacia las tecnologías, pensando que estas resolverían los problemas de los sistemas educativos, esperanza que nunca se ha correspondido

con la realidad, como nos recuerda L. Cuban en *Teachers and machines. The classroom use of technology since 1920*, [*véase* «¿Se aprende mejor con las TIC?», por Manuel Area Moreira; Investigación y Ciencia, marzo de 2011].

En primer lugar, hubo una larga etapa pre-Internet basada, sobre todo, en el uso de los ordenadores, en la que se almacenaban los contenidos en todo tipo de soportes, desde los disquetes, los discos duros internos o los CD-ROM en su momento. En esta fase, los contenidos y la interacción educativa se hallaban «encapsulados», pues eran medios o soportes no actualizables y se fundaban en una cierta ramificación (*branching*), según las elecciones cerradas de los usuarios. Respondían a concepciones conductistas del aprendizaje, según las cuales este se producía por mecanismos de asociación entre estímulos, respuestas y recompensa (una versión elaborada del condicionamiento clásico de Pavlov); en otros casos, se basaban en modelos cognitivistas, que concebían un elemento mediador entre esos contenidos encapsulados y la respuesta, esto es, la mente humana y su manera de procesar la información según esquemas y conocimientos previos. Cuando se utilizaban en solitario, en modo de autoaprendizaje, operaban como una suerte de «enseñanza programada», mejorada y más compleja, al estilo de la desarrollada por Skinner y otros psicólogos para los libros de texto.

A esa fase le siguió la irrupción de Internet, que lo cambió casi todo. Por una parte, la educación a distancia encontró un medio y unas posibilidades técnicas mucho más adecuadas a sus objetivos. Asimismo, después de venir empleando durante años herramientas como el correo electrónico o los boletines de noticias para una comunidad de usuarios (al estilo del *Minitel* francés, el más famoso de ellos), el uso de aplicaciones por separado se transformó en un entorno con un conjunto de funcionalidades, amparadas en la metáfora de un campus universitario, un «campus virtual» con foros de discusión, biblioteca, aulas, un café para conversaciones informales, un servicio de correos y otras aplicaciones. De hecho, esta es todavía la concepción mayoritaria sobre el *e-learning*, una suerte de campus virtual en el que los profesores depositan contenidos, muchas veces en forma de lecturas, y los estudiantes responden a determinadas tareas de comprensión de esas lecturas. Existen otras variantes más complejas y otras formas de comunicación entre profesores y estudiantes, pero el núcleo del *e-learning* reproduce una traslación a entornos electrónicos de formas educativas tradicionales.

La tercera etapa corresponde a la llegada de la Web 2.0 al ámbito de la educación digital. Esta ha conllevado dos avances notables: una renovación de las tecnologías subyacentes con mayor capacidad de interacción y colaboración, y una concepción educativa que dota al estudiante (usuario) de una posición más participativa y menos reactiva. Es decir, se ha pasado —o más bien se ha iniciado el paso, pues todavía nos hallamos en ese cambio— de un enfoque tradicional y muy basado en el profesor como único agente del diseño de los cursos y contenidos digitales, a una concepción más centrada en el estudiante, al que se considera con voz propia. Este cambio no es solo tecnológico (blogs, wikis, vídeos y fotos en línea), sino que debe mucho a las teorías sobre el aprendizaje, que lo contemplan cada vez más como un proceso social y de influencia mutua, y no como una reacción a estímulos complejos. Estas teorías socioculturales son las que han enfatizado los procesos de interacción y diálogo, así como de pertenencia a una comunidad de práctica que da sentido a los aprendizajes; otras concepciones como la conectivista, sin embargo, han propuesto que hay procesos autoorganizativos que se dan por el simple hecho de coincidir gran número de sujetos en una red, de forma que el aprendizaje acontece casi de manera emergente.

Asimismo, en estos últimos diez años, la tecnología y su impacto social (mundos virtuales como *Second Life*, distribución ubicua de los contenidos a través de dispositivos portátiles, teléfonos y tabletas) han ido muy por delante de los modelos pedagógicos imperantes, que se han considerado poco adecuados para una realidad tan cambiante.

GLOBALIZACIÓN

Esa nueva ola de dispositivos se ha unido al uso de Internet como sustituto de los soportes en papel. Algo que parecía una promesa se ha hecho realidad, hasta el punto de que grandes universidades, el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) en un principio y luego otras, iniciaron una campaña para distribuir sus cursos de manera gratuita en la red, en una iniciativa conocida como *OpenCourseware*. Apenas unos pocos años después, han aparecido los cursos masivos abiertos en línea (MOOC, por sus siglas en inglés), como una consecuencia de lo anterior, unidos al interés de algunas empresas por patrocinarlos [*véase* «Exageración o promesa», por Jeffrey Bartholet, *en este mismo número*]. El impacto de este nuevo modelo educativo en España ha sido elevado. Muchas universidades disponen de cursos y materiales gratuitos bajo licencias de distribución de tipo Creative Commons; asimismo, han comenzado a ofertarse los primeros MOOC españoles.

Los MOOC persiguen dos propósitos iniciales muy positivos. Por un lado, presentar contenidos organizados en forma de curso, de manera gratuita y totalmente abiertos a cualquier persona, por las mejores universidades y profesores; es decir, superar las barreras sociales y económicas de acceso a una educación de calidad. Por otro, ofrecer un acceso masivo, es decir, que la matrícula no está limitada por la capacidad del aula (de 20 a 200 estudiantes, por poner dos límites habituales), sino que potencialmente es (casi) ilimitada: normalmente de unos pocos cientos o miles a más de cien mil estudiantes, como en algunos de la Universidad Stanford (160.000 en el curso de introducción a la inteligencia artificial).

Pese a su ambicioso planteamiento, para muchos expertos los MOOC se encuentran todavía en una fase muy inicial, con una concepción pedagógica más parecida a la etapa pre-Internet mencionada que a otras más recientes. En especial, los que se organizan en torno a plataformas nuevas pero convencionales, como Coursera en Estados Unidos y Miríada X en España. Se basan en pequeñas lecciones en vídeo a cargo de profesores experimentados, en general de buena calidad, y en un sistema de evaluación básico con preguntas y alternativas cerradas de respuestas mediante elección múltiple. En otras palabras, para poder ser masivos, los MOOC «empaquetan» sus contenidos de manera simple, los ofrecen también de forma lineal, poco o nada individualizada, y reducen la retroalimentación a una puntuación sobre esos cuestionarios. Es lógico que sea de esta manera, o parecida, si los estudiantes se cuentan por miles y, además, la matrícula es gratuita; la transformación de estos cursos en algo más sutil entrañaría unos costes muy elevados.

Se puede pensar —con razón— que la educación cara a cara es elitista por sus costes asociados. En ella se basan las universidades presenciales, y también otros niveles educativos. De ahí que los MOOC puedan ser vistos como una alternativa instructiva a un sistema complejo y caro. Los cursos masivos articularían un tipo de enseñanza con fines y medios distintos a los de la educación universitaria tradicional, presencial, virtual o híbrida. La gratuidad de los mismos es posible cuando no conducen a ningún tipo de acreditación profesional (las universidades públicas, aunque entidades sin ánimo de lucro, no son benéficas —no pensemos ya en las privadas—). Pero incluso si se quisiera acreditar o, simplemente, evaluar de manera más adecuada, a decenas de miles de estudiantes, se nos plantearía un problema muy grave, pues no hay una solución mágica que nos diga cómo hacerlo.

Si ya la educación presencial plantea a veces dudas sobre su calidad y la educación a distancia todavía hoy es discutida, ¿qué decir de un tipo de cursos que solo logran superar un diez por ciento de los matriculados? ¿Cómo no pensar en ese noventa por ciento de estudiantes que abandonan o que, simplemente, se matriculan pero luego no siguen el curso? Sin duda, en los próximos años aparecerán investigaciones sobre cómo viven los estudiantes este tipo de situaciones; ello nos permitirá saber y entender por qué lo hacen.

Los MOOC se parecen más a cursos de enseñanza programada basados en la obra de Burrhus Frederic Skinner, a enciclopedias audiovisuales universitarias en línea, enfoque que parecía ya olvidado desde hace más de 50 años. Tony Bates, quizá la persona más influyente en el campo de la educación digital, ha sido muy crítico con esta falta de fundamento pedagógico que muestran algunas universidades pioneras: «En mi opinión, el MIT tendrá dificultades para lograr un impacto en la investigación educativa si continúa ignorando la posible contribución de los educadores. Es como si Piaget, Bruner, Vygotsky, Carl Rogers, Gagné y otros muchos nunca hubieran existido. ¿Se pueden imaginar a alguien intentando desarrollar una nueva forma de transporte ignorando la mecánica newtoniana? Y, sin embargo, esto es lo que el MIT está haciendo en su investigación educativa. De hecho, como muestran los estudios que hemos descrito [la investigación sobre educación a distancia de los últimos 25 años], están reinventando la rueda».

Los MOOC parecen estar aquí para quedarse y evolucionar, dejar de ser solo un compendio de contenidos, y aprender de las técnicas y conceptos de los modelos de educación virtual previos. Necesitan adaptar nuevos enfoques, mejorar la evaluación, incluir tecnologías que individualicen la retroalimentación a partir de nuevos modelos teóricos, y convivir mejor con los modelos presenciales e híbridos de las universidades. Sin duda, va a ser necesaria una estrategia más creativa que el mero traslado de contenidos a lecciones audiovisuales, por buenos que sean estos y sus profesores.

Si algo sabemos es que la educación digital ha utilizado metodologías de enseñanza y aprendizaje que han imitado lo mejor de lo presencial (pensemos en el aprendizaje basado en problemas y en proyectos, el estudio de casos o la inclusión de comunidades virtuales de práctica y de aprendizaje) y que su proceso de desarrollo y mejora no ha hecho más que empezar. Como decíamos al inicio, algunos de los resultados de la investigación educativa son siempre controvertidos; también en el campo de la educación digital. Ello nos debe animar a investigar más y mejor, pues el tema entraña una gran relevancia social.

José Luis Rodríguez Illera *es catedrático de la facultad de pedagogía de la Universidad de Barcelona, desde donde dirige el Observatorio de la Educación Digital y la revista* Digital Education Review.

PARA SABER MÁS

Comunidades virtuales de práctica y de aprendizaje. Monográfico coordinado por J. L. Rodríguez Illera en *Revista Electrónica Teoría de la Educación. Educación y Cultura en la Sociedad de la Información* vol. 8, n.º 3, diciembre de 2007. Disponible en **www.usal.es/teoriaeducacion**

Three generations of distance education pedagogy. T. Anderson y J. Dron en *The International Review of Research in Open and Distance Learning*, marzo de 2011.

Learning online: massive open online courses (MOOC), connectivism, and cultural psychology. M. Clarà y E. Barberà en *Distance Education*, vol. 34, n.º 1, págs. 129-136, 2013.

Página web del Observatorio de la Educación Digital: **oed.ub.edu**

por Fernando Jordán Montés

La visión de los insectos

Aunque los ojos compuestos creen numerosas imágenes parciales, el cerebro de los insectos podría elaborar una representación nítida y única

Numerosos insectos emplean la vista para localizar el alimento, la pareja sexual, el nido, las posibles presas y los eventuales enemigos. Los adultos presentan dos tipos de órganos visuales: los ojos simples (ocelos) y los compuestos. La mayoría de los insectos poseen dos ojos compuestos, que pueden coexistir con los ocelos, estos últimos generalmente en número de tres.

Los ojos simples son una estructura muy rudimentaria y carecen de mecanismo de enfoque; no crean una verdadera imagen de los objetos, tan solo distinguen diferencias en la intensidad de la luz. Su función consiste en activar y desactivar determinados mecanismos fisiológicos del organismo.

Los ojos compuestos son órganos sensoriales mucho más complejos, capaces de generar en el cerebro de los insectos imágenes que revelan la forma y el color de los objetos. Están formados por la agregación de omatidios, cuyo número oscila mucho según las especies. En los distintos géneros de hormigas varía entre 6 y 1000; la mosca doméstica posee unos 4000; la abeja, unos 6000; las mariposas, entre 10.000 y 30.000, según la especie; y las libélulas, más de 40.000.

Los omatidios se hallan separados unos de otros por medio de una capa de pigmento, de modo que cada uno de ellos se comporta como un ojo independiente. Así, una imagen completa se obtiene a partir de la suma de las imágenes parciales recogidas por la totalidad de los omatidios. Como resultado, los insectos logran una visión con más grano y menor definición que la que proporciona el ojo de los animales superiores, aunque la resolución final depende del número de omatidios. Los insectos dotados de decenas de miles de omatidios (mariposas y libélulas) consiguen una agudeza visual excelente.

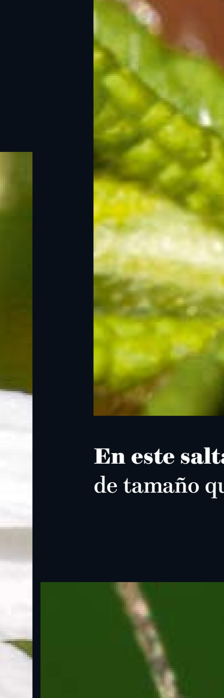
Las últimas investigaciones desarrolladas en este campo hacen pensar que, del mismo modo que en los vertebrados la información procedente de los dos nervios ópticos es analizada en el cerebro para ofrecer una imagen única, quizás en los insectos suceda algo semejante, y el resultado final de la visión de un ojo compuesto no sea tan granulado como cabría esperar. El ojo del insecto crea miles de imágenes parciales, pero tal vez su cerebro elabore, a partir de éstas, una representación cromática nítida y única.

—Fernando Jordán Montés

Cabeza del tábano (*Haematopoda*) aumentada 100 veces. Muestra el característico aspecto reticulado del ojo compuesto.



Desde su privilegiada atalaya, la libélula *Perithemis* sp., dotada de una visión aguda gracias a sus ojos compuestos de más de 40.000 omatidios, localiza y captura en el aire a los insectos que constituyen su dieta.



En este saltamontes Acrídido podemos apreciar la diferencia de tamaño que existe entre el ojo simple (*1*) y el compuesto (*2*).

En esta mosca cernidora de la familia de los Sírfidos, que mide unos 12 milímetros de longitud, los impresionantes ojos compuestos superan la anchura del propio cuerpo.



La mariposa blanca de la col (*Pieris brassicae*) localiza las flores y se orienta en el entorno con ayuda de su nítida visión.

ILUSTRACIONES DE FERNANDO JORDÁN MONTES

por Alfredo Marcos



Alfredo Marcos es catedrático de filosofía de la ciencia en la Universidad de Valladolid.

Libertad y belleza en *La théorie physique*

El pensamiento de Pierre Duhem busca la superación de las tensiones entre ilustración y romanticismo

Pierre Duhem es el autor de uno de los libros señeros dentro del campo de la filosofía de la ciencia. Su título original en francés es *La théorie physique. Son object, sa structure* («La teoría física. Su objeto, su estructura»). La obra ha ejercido un influjo determinante en autores de todas las tendencias.

Su método para el análisis de las teorías físicas tuvo gran influencia sobre la filosofía de los neopositivistas. Su crítica al verificacionismo (la idea de que los datos experimentales pueden verificar definitivamente una teoría) precedió a la de Karl Popper. A partir de la crítica duhemiana al falsacionismo (los datos empíricos pueden refutar definitivamente una teoría) se desarrolló una concepción holística de la ciencia que ha servido de inspiración al filósofo estadounidense W. O. Quine. El holismo también ha sido defendido por los estructuralistas contemporáneos; alguno de ellos, como el español Ulises Moulines, han apoyado una concepción instrumentalista de la ciencia inspirada en la obra de Pierre Duhem. La importancia que Duhem otorgó a la historia de la ciencia ha tenido su reflejo en la obra de los historicistas, como Thomas Kuhn. La libertad metodológica que Duhem propone, así como su tendencia a rehabilitar tradiciones distintas de la propia ciencia, le aproximan a Paul Feyerabend. Y, por último, Duhem también ha servido de inspiración a los que abogamos por una concepción prudencial de la racionalidad.

Como se ve, las ideas que Pierre Duhem expuso en su libro *La théorie physique* han resultado claves para el desarrollo de toda la filosofía de la ciencia posterior. Sin embargo, el propio autor resulta poco conocido incluso en ambientes científicos y filosóficos. En 2014 se cumplirá un siglo desde la segunda edición



WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

de *La théorie physique*, a partir de la cual se han realizado las recientes ediciones francesas (1989, 2007) y las traducciones inglesa (1954) y española (2003). Bueno sería que llegásemos a dicha efeméride con un conocimiento y aprecio más justo del pensador francés.

Pierre Duhem nació en París en 1861 y murió en Cabrespine en 1916. La mejor fuente para sus datos biográficos la tenemos en el libro de su hija Hélène (*Un savant français: Pierre Duhem*, 1921). La esposa de Pierre murió al dar a luz a su segundo hijo, que tampoco sobrevivió. La vida de Duhem, en lo personal, se centró entonces en el cuidado de Hélène. Puede leerse la emotiva y lúcida correspondencia que Pierre le dirigió (*Lettres de Pierre Duhem à sa fille Hélène*, 1994), y que tanto recuerda la relación epistolar entre Galileo y su hija.

En lo profesional, consagró su labor a la investigación en termodinámica y en electromagnetismo, a la filosofía y a la historia de la ciencia. Impartió clases en Lille y Burdeos. Nunca obtuvo un puesto en París debido a sus posiciones ideológicas, muy alejadas de las de las clases dirigentes de la época. Dejó, además, una obra pictórica más que notable. El científico húngaro Stanley Jaki ha escrito acerca de la relación entre la física y la pintura de Pierre Duhem (*The physicist as artist: The landscapes of Pierre Duhem*, 1988). El propio Duhem se consideraba principalmente un físico, si bien sus méritos en historia y filosofía de la ciencia son también de primera magnitud. Fue uno de los fundadores de la historia de la ciencia como disciplina autónoma y el descubridor de la ciencia medieval, que se creía prácticamente inexistente hasta la publicación de su monumental obra *Le système du monde* (diez volúmenes publicados también hace un siglo, entre 1913 y 1915).

Es evidente que la figura del científico francés, tan polifacética, es inabordable en el breve formato de un artículo. Por eso me centraré tan solo en dos aspectos de su *Théorie physique* que considero de especial interés y actualidad: su insistencia en la libertad metodológica del científico y en las cualidades estéticas de la teoría física.

Ha existido siempre una polarización entre lo sentimental y lo racional. La manifestación histórica de esta dicotomía antropológica la vemos en el debate «eterno» entre tendencias románticas e ilustradas. El historiador de la ciencia de Harvard Gerald Holton caracteriza incluso la posmodernidad como una revuelta neorromántica. Ciertos autores se han puesto descaradamente del lado del sentimiento; otros, de la razón. Unos han adoptado posiciones claramente románticas; otros, ilustradas. Pero no son pocos los que han pretendido algún género de integración de los dos polos. Duhem propone una respuesta integradora al de-

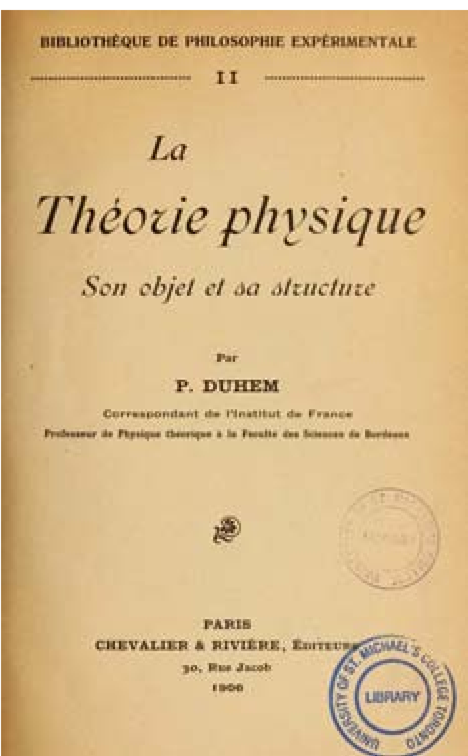
bate de su tiempo entre ilustración y romanticismo.

Su filosofía de la física presenta un doble recorrido. Por una parte, hace un análisis lógico de la teoría física y de su conexión con la experiencia. Por otra, muestra el desarrollo histórico de la física y sus relaciones con la metafísica, el sentido común y estético, y el lenguaje común. El resultado del primer itinerario es un claro instrumentalismo, pero en el segundo la física recobra su realismo.

Sigamos el primer camino. La metodología duhemiana es hipotético-deductiva. El surgimiento de las hipótesis en la mente del científico requiere trabajo, maduración reflexiva, familiaridad con el fenómeno en cuestión. Pero la hipótesis —nos dice Duhem— «germina en él sin él». Y, una vez concebida la idea, su «libre y laboriosa actividad debe entrar en juego» para «desarrollarla y hacerla fructificar». No hay lógica del descubrimiento, hay un acto creativo, preparado por un libre proceso de maduración y prolongado en investigaciones a las que también atribuye Duhem una gran libertad metodológica.

La experiencia interviene al final. El científico, tras desarrollar la hipótesis y hacer predicciones, puede compararlas con la experiencia. Pero Duhem se muestra escéptico sobre los resultados de dicha comparación. Pone en pie una seria crítica al verificacionismo y al falsacionismo. Si de una hipótesis (H) se sigue un hecho observacional (O) y, efectivamente, este es observado, entonces tenemos lo siguiente: $(H \to O) \wedge O$. De ahí no se sigue H. Luego, en estricta lógica, no hay modo de verificar una hipótesis. Tampoco de refutarla. En efecto, de $(H \to O) \wedge \neg O$ se sigue $\neg H$, pero el esquema es demasiado simple respecto de la ciencia real. Para obtener la predicción necesitamos, además de la hipótesis, un amplio conjunto de enunciados que actúan como supuestos auxiliares. Llamemos a este conjunto A. El esquema quedaría así: $((H \wedge A) \to O) \wedge \neg O$, de donde se sigue que $\neg(H \wedge A)$, es decir, $\neg H \vee \neg A$. En otras palabras, o bien la hipótesis es falsa, o bien ha fallado alguno de los supuestos auxiliares. Podemos, libremente, optar por revisar la hipótesis o bien alguno de los supuestos auxiliares, pero esta decisión no nos la dicta ya la lógica, sino el buen sentido (*bon sens*) del científico. Este buen sentido metodológico es fruto de una buena formación, de un cierto sentido común y estético, e incluso del conocimiento histórico que el científico tiene de su disciplina.

La idea de que la ganancia en simplicidad y orden nos aproxima a la realidad no deriva del análisis lógico, sino de la convicción de que la naturaleza es simple y ordenada


BIBLIOTHÈQUE DE PHILOSOPHIE EXPÉRIMENTALE

II

La

Théorie physique

Son objet et sa structure

Par

P. DUHEM

Correspondant de l'Institut de France

Professeur de Physique théorique à la Faculté des Sciences de Bordeaux

PARIS

CHEVALIER & RIVIÈRE, Éditeurs

30, Rue Jacob

1906

Lo que se expone a la experiencia no son enunciados aislados, sino grandes zonas de la física $(H \wedge A)$. Algunos pensadores, como Quine, han sugerido que, en realidad, en cada experimento se pone en juego toda la ciencia. Esta doctrina se denomina *holismo* o *tesis Duhem-Quine*.

En la construcción de la física queda siempre un cierto margen de libertad, es decir, ni la lógica ni los datos experimentales determinan por completo la aceptación o rechazo de una teoría. Así, lo más que podemos esperar de la física es una clasificación útil de los hechos y las leyes, economía mental y predicciones eficaces. En resumen, nos hallamos ante una concepción instrumentalista de la física. Hasta aquí llega el recorrido del análisis lógico. Pero esta posición tan cruda se matiza con el recorrido histórico.

La historia de la física nos hace ver que la representación de los hechos es cada vez mejor, más ordenada, simple, exacta y coherente. El horizonte último de la teoría física, según Duhem, es llegar a ser una «clasificación natural» de los hechos. La clasificación natural «es la forma ideal hacia la que debe tender la teoría física». El concepto de clasificación natural es clave para corregir el instrumentalismo; a través del mismo se tiende un puente entre la teoría física y la realidad.

La idea de que la ganancia en simplicidad y en orden nos aproxima a la realidad no deriva del análisis lógico, sino de la convicción de que la naturaleza es simple y ordenada. Contiene, además, connotaciones estéticas. En Duhem, la libertad metodológica es muy amplia, y la función del científico es creativa, como la del artista. Late aquí la idea platónica del mundo como un cosmos, en su triple sentido de orden, belleza y realidad. Lo bello nos acerca a lo real, y la teoría científica tiende históricamente hacia un estado de clasificación natural que contiene las notas de simplicidad y orden, de belleza en suma.

La captación del progreso de la teoría física hacia una clasificación natural no es estrictamente lógica. La *subdeterminación* que deja como estela el análisis lógico viene a ser paliada, sin pérdida de racionalidad, por otros elementos. El mensaje del progreso científico va dirigido al ser humano completo, con su experiencia sensorial, su intelecto, sus emociones y sentimientos, su sentido estético, sentido lógico y sentido común.

PARA SABER MÁS

Uneasy genius: The life and work of Pierre Duhem. Stanley Jaki. Martinus Nijhoff, 1984.

Pierre Duhem. La filosofía de la ciencia en sus orígenes. Alfredo Marcos. PPU, 1988.

La teoría física. Su objeto y su estructura. Pierre Duhem. Herder, 2003.

La théorie physique. Son objet, sa structure. Pierre Duhem. Vrin, 2007.

«Pierre Duhem». Roger Ariew en *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. **http://plato.stanford.edu/entries/duhem**, actualizado el 20 de enero de 2011.

por Dennis M. Bartels

Dennis M. Bartels es director ejecutivo del Exploratorium de San Francisco.



Las buenas preguntas

No es en el aula donde mejor se aprende a pensar de forma crítica

Una democracia se cimienta en un electorado que posea pensamiento crítico. Sin embargo, la enseñanza formal, cuya fuerza motriz son los exámenes y los títulos, está dejando de lado, y cada vez más, la exigencia de que los estudiantes planteen la clase de preguntas que llevan a decidir con fundamento.

Hace más de diez años que John D. Bransford y Daniel L. Schwartz, científicos de la cognición, por entonces en la Universidad Vanderbilt, observaron que la diferencia entre los niños y los adultos jóvenes no era su capacidad para retener datos o para aplicar los conocimientos adquiridos a situaciones nuevas, sino una cualidad a la que llamaron «preparación para el aprendizaje futuro». Pidieron a alumnos de quinto curso de primaria y a universitarios de primer ciclo que idearan un programa para proteger de la extinción al águila americana, o águila calva. Para sorpresa de los investigadores, los dos grupos ofrecieron planes de calidad similar (aunque los universitarios, con menos faltas de ortografía). Desde el punto de vista de un educador tradicional, este resultado señalaba que la escolarización no había conseguido que los estudiantes reflexionasen sobre los ecosistemas y la extinción de especies, ideas científicas de primera magnitud.

Bransford y Schwartz, no obstante, decidieron calar más hondo. Pidieron a los dos grupos que planteasen cuestiones sobre aspectos que deben considerarse en la elaboración de un programa de conservación. En esta tarea sí observaron grandes diferencias. Los universitarios se centraron en aspectos críticos de la interdependencia de las águilas y sus hábitats («¿En qué tipo de ecosistema viven las águilas?» o «¿Qué clase de especialistas hacen falta en las diferentes áreas de repoblación?»). Los alumnos de primaria tendían a centrarse en características de las rapaces («¿Cuán grandes son?» o «¿Qué comen?»). Los universitarios habían cultivado la facultad de preguntar lo relevante, una destreza que es cimiento del pensamiento crítico. Habían aprendido a aprender.

Los museos y otras instituciones de enseñanza no reglada (o informal) pueden resultar más aptos para enseñar esta capacidad que las escuelas de primaria o secundaria. En el Exploratorium de San Francisco hemos estudiado en qué medida el aprender a formular preguntas sin respuesta obvia afecta a la calidad de la indagación científica. Observamos que al enseñar a los visitantes a plantear cuestiones del tipo «¿Y si...?» o «¿Cómo se puede...?», que ninguno sabía responder, se picaba su curiosidad; en el siguiente módulo expositivo prestaban mayor atención, hacían más preguntas, realizaban más experimentos e interpretaban mejor los resultados que obtenían. Sus preguntas se hacían más generales. En lugar de limitarse a fenómenos que deseaban comprobar («¿Qué ocurre cuando se bloquea un imán?»), tendían a incluir en la cuestión tanto la causa como el efecto («Y si tiramos este imán y miramos si los otros se mueven por igual?»). Al parecer, la aptitud para plantear preguntas con enjundia constituye una destreza transferible y adecuada para ahondar e indagar cooperativamente en el contenido científico de las piezas expuestas.

Este tipo de aprendizaje no está confinado a museos o sistemas institucionales. Uno de los mejores ejemplos lo hallamos en *The daily show with Jon Stewart*, programa televisivo en el que el presentador destripa titulares de prensa (políticos, publicitarios o presuntamente científicos) echando mano de cifras, de la lógica y de vídeos antiguos. The Maker Faire, una feria en la que se presentan proyectos técnicos para realizar por uno mismo, ha resucitado la idea de que los errores enriquecen el aprendizaje. Los experimentalistas del «hazlo tú mismo» se atascan, replantean el problema y lo resuelven.

Los ambientes de aprendizaje informal son más tolerantes con los errores que las escuelas. Es posible que los docentes tengan demasiado tasado su tiempo y no puedan dejar que los alumnos planteen y persigan asuntos de su interés; o que tengan demasiado material que explicar en sus currículos y demasiadas pruebas que preparar y corregir. Pero es imprescindible que la destreza de que hablamos se adquiera, de la forma que sea. Nuestra sociedad depende de que sus miembros sean capaces de tomar decisiones críticas, ya conciernan a sus tratamientos médicos, a las necesidades energéticas del país o a problemas de escala planetaria. Y se dispone, a tal fin, de un robusto sistema de aprendizaje informal, que prescinde de grados, que recibe a todo el que acude a él y que es accesible incluso durante las vacaciones y los fines de semana.



ELLEN WEINSTEIN

por Pere Castells



Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es coordinador del proyecto UB-Bullipedia.

Texturas blandas

De la alta restauración a los geriátricos

Una de las funciones básicas de las preparaciones culinarias corresponde al aporte de los nutrientes necesarios para poder realizar nuestras funciones. Pero no es la única. La actividad alimentaria humana se funda también en el placer, un aspecto primordial según Jesús Contreras, antropólogo social de la Universidad de Barcelona.

El placer culinario guarda relación con la percepción sensorial. A lo largo de la historia de la gastronomía, el papel más destacado de la participación sensorial en las elaboraciones se había reservado al sabor y, en menor grado, al olor; sabemos, no obstante, que la vista también desempeña una función importante.

Ya desde finales del siglo xx, pero sobre todo en el xxi, otro factor ha adquirido protagonismo. Nos referimos a lo que en la cocina se denomina «textura». A partir del desarrollo de este concepto se han elaborado en la alta restauración platos tan emblemáticos como las esferificaciones, las espumas muy aireadas y los destilados espesados en frío [*véase* «La nueva cocina científica», por Claudi Mans y Pere Castells; Investigación y Ciencia, octubre de 2011].

Los elementos clave de esta revolución han sido los gelificantes, espesantes, emulsionantes y espumantes que, al modificar la textura de los alimentos, crean nuevas sensaciones organolépticas que han revolucionado el panorama culinario. De la mano de Ferran Adrià, Joan Roca, Heston Blumental y otros —y merced a su comercialización—, han ido penetrando en la cocina mundial y poco a poco en la sociedad. El agar, la goma gellan, la metilcelulosa y la goma xantana son los productos estrella.

Lo más interesante de este fenómeno es su potencial en diferentes campos de la cocina social. Nos centraremos aquí en su aplicación a dietas blandas para colectivos con necesidades especiales, concretamente en geriátricos.

En el año 2011, los servicios de bienestar social de Baden-Würtenberg se propusieron utilizar la cocina de vanguardia (mayoritariamente la de Ferran Adrià) para aplicarla a la alimentación de la tercera edad, sobre todo de personas con problemas de deglución. El proyecto OptiMahl, en el que también colaboran HamppTexturas y Culinaris Catering, inició su experiencia en cuatro residencias para ancianos: el Altenburgheim (en Bad Cannstatt), el Eduard-Mörike (sur de Stuttgart), el Ludwigstift (este de Stuttgart) y la casa Heckengäu (en Heimsheim). Todos ellos han seguido criterios de cocina de vanguardia.

El objetivo era intentar minimizar la pérdida nutricional observada en los residentes, sobre todo en los que requerían dietas blandas, como los enfermos de párkinson, alzhéimer y demencia. La implicación de los cocineros de dichos centros ha sido excelente. Han logrado adaptar propuestas de investigación gastronómica a casos con necesidades específicas.

En el geriátrico de Altenburgheim, sumado más tarde al plan de mejora, uno de cada cinco pacientes se alimenta solo a base de comida triturada. Antes de entrar en el proyecto, su dieta se componía básicamente de puré de patatas y carne muy triturada; ahora, en cambio, incluye productos variados y sabores diversos.



CORTESÍA DE HAMPPTEXTURAS

Una de las preocupaciones iniciales eran los costes adicionales generados por la aplicación de los nuevos productos. En este aspecto, Kurt Gollnik, jefe de cocina del Altenburgheim, explica que si antes necesitaba unos 70 gramos de harinas o almidones por litro de líquido para espesar las cremas o salsas, ahora le bastan 4 o 5 gramos por litro. Si bien al inicio hace falta invertir tiempo para la formación de los profesionales de la cocina, una vez dominada la técnica, el plato final no resulta mas caro que el convencional.

En cuanto al objetivo inicial de minimizar la desnutrición en estos colectivos, la aceptación de los consumidores ha sido radical. Y no solo se ha cuantificado en la cantidad de comida no consumida (en palabras del personal, «los platos vuelven ahora vacíos»), sino que muchas personas con dificultades de ingestión que se aislaban en su habitación durante las comidas han regresado al comedor junto con los demás; es más, un residente que se alimentaba mediante sonda gástrica ha podido volver a ingerir con normalidad.

Un ejemplo de la aplicación de productos texturizantes corresponde a la utilización de la goma xantana en zumos de fruta. Con este espesante se consigue que las personas con disfagia recuperen el reflejo para ingerir y además se conservan todas las propiedades nutricionales y organolépticas del zumo. También se han preparado en este proyecto bacalao con salsa de azafrán, «gominolas» de col lombarda, panacota y ciervo con coles de Bruselas, entre otros platos.

Desde el año 2011, la iniciativa no ha parado de crecer. Ya a principios de 2013 se contaba con unos 100 centros participantes. Y las previsiones indican que se llegará a 500 en 2014.



Antoine Chambert-Loir es profesor de matemáticas en la Universidad de Rennes 1.

MATEMÁTICAS

El legado de Évariste Galois

Las investigaciones del joven matemático francés articularon varios campos de la matemática moderna; entre ellos, la teoría de cuerpos finitos

Antoine Chambert-Loir

La vida del matemático francés Évariste Galois (1811-1832) fue corta y tumultuosa; murió a la edad de veinte años en circunstancias trágicas. Sin embargo, a pesar de la brevedad de su obra, que apenas ocupa 60 páginas, sus hallazgos marcarían profundamente la historia de las matemáticas. Realizó varios descubrimientos fundamentales en la teoría de ecuaciones polinómicas, donde halló un criterio para determinar bajo qué condiciones un polinomio podía resolverse por radicales. A Galois debemos también la emergencia de las nociones de grupo y cuerpo finito, estructuras matemáticas que hoy desempeñan un papel clave en numerosos campos.

A continuación repasaremos algunas de esas contribuciones. Comenzaremos por las ecuaciones polinómicas y los números complejos, para llegar después a las ecuaciones en congruencias. Estas nos permitirán introducir la noción de cuerpo finito, la cual nos servirá para presentar una de sus aplicaciones modernas: la criptografía asimétrica.

¿PUEDE ESCRIBIRSE LA SOLUCIÓN?

Las ecuaciones que nos interesan poseen una sola incógnita, a la que llamaremos x, y constan de una suma términos en potencias positivas de dicha incógnita: x, x^2, x^3, etcétera. La mayor potencia de todas recibe el nombre de grado de la ecuación.

Las ecuaciones polinómicas de primer grado son elementales. Consideremos, por ejemplo, $3x - 5 = 0$. La solución se obtiene sumando a ambos lados de la igualdad el término constante (5, en este caso) y dividiendo después por el término lineal (3). Este método nos permite hallar el valor de x que satisface la ecuación: $x = 5/3$.

En cuanto a las ecuaciones de segundo grado, su forma más general puede escribirse como $ax^2 + bx + c = 0$, donde a, b y c denotan tres coeficientes conoci-

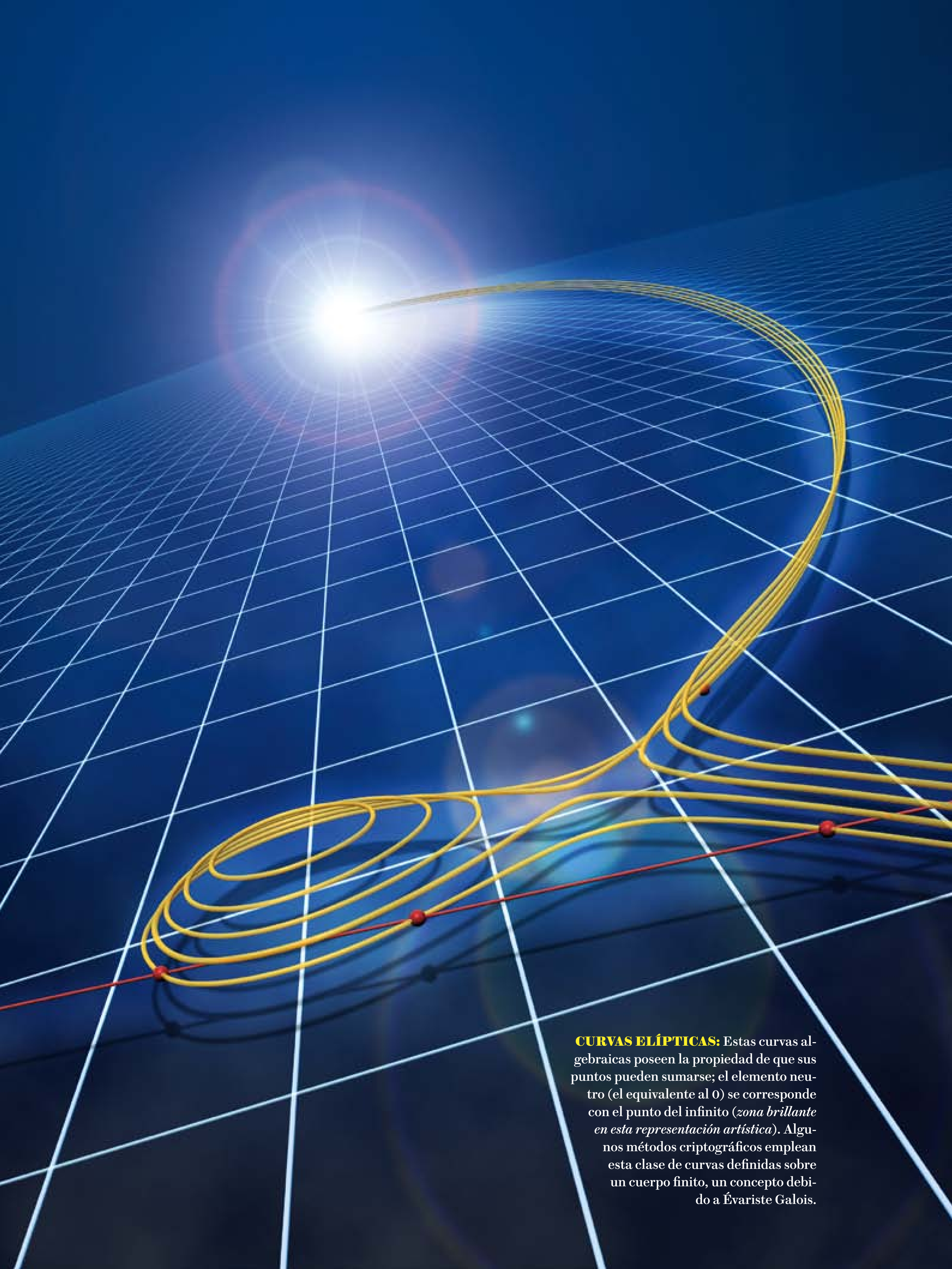
EN SÍNTESIS

Évariste Galois fue un matemático prodigioso pero incomprendido. Murió en un duelo a la temprana edad de veinte años.

A pesar de ello, realizó contribuciones fundamentales a la teoría de las ecuaciones polinómicas, la teoría de grupos y la de cuerpos finitos.

Hoy el legado científico de Galois toca numerosos dominios de las matemáticas y sus aplicaciones; entre ellas, la criptografía.

BRUNO BOURGEOIS



CURVAS ELÍPTICAS: Estas curvas algebraicas poseen la propiedad de que sus puntos pueden sumarse; el elemento neutro (el equivalente al 0) se corresponde con el punto del infinito (*zona brillante en esta representación artística*). Algunos métodos criptográficos emplean esta clase de curvas definidas sobre un cuerpo finito, un concepto debido a Évariste Galois.

Galois, héroe trágico



Évariste Galois nació el 25 de octubre de 1811 en Bourg-la-Reine, al sur de París. Murió el 31 de mayo de 1832, a la edad de 20 años, en un duelo del que no pudo retirarse y rodeado de circunstancias oscuras. Al parecer, guardaba relación con «una infame coqueta y [...] dos víctimas de la coqueta», según una de sus cartas.

Galois se interesó por las matemáticas a la edad de 16 años. Junto con la política, estas acabarían convirtiéndose en una de las pasiones de su vida. Mal preparado, suspendió dos veces el examen de ingreso a la Escuela Politécnica, la más prestigiosa del momento. Consiguió ser admitido en la Escuela Preparatoria, que más tarde se convertiría en la Escuela Normal Superior, pero fue expulsado a principios de 1831. Algo después envió a la Academia de las Ciencias su memoria «Sobre las condiciones de resolubilidad de las ecuaciones por radicales». Aunque en un primer momento el texto fue admitido por la institución, más tarde sería rechazado por los matemáticos Sylvestre Lacroix y Denis Poisson, quienes lo juzgaron incomprensible.

Los trabajos de Galois permanecieron olvidados hasta que, en 1843, Joseph Liouville los presentó ante la Academia de las Ciencias por insistencia del hermano de Évariste y su amigo Auguste Chevalier. Finalmente, su obra vio la luz en 1846.

dos, y $a \neq 0$. Un ejemplo lo hallamos en la ecuación $x^2 - x - 1 = 0$, una de cuyas soluciones es la proporción áurea.

Hace más de cuatro siglos que sabemos resolver todas las ecuaciones de segundo grado. Sus dos soluciones vienen dadas por la fórmula $x = (-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac})/2a$, una expresión bien conocida por los alumnos de secundaria y de la que podemos decir que forma parte del patrimonio cultural común. Para la ecuación de arriba, vemos que dicha fórmula nos da las soluciones $x = (1 \pm \sqrt{5})/2$. El número áureo se corresponde con la solución de signo positivo: $(1 + \sqrt{5})/2$.

En las expresiones anteriores los coeficientes a, b y c pueden tomar cualquier valor. En teoría de números, sin embargo, la situación más relevante aparece cuando dichos coeficientes vienen dados por números enteros. En tal caso, puede verse que las soluciones son racionales cuando el discriminante (la expresión que aparece dentro de la raíz cuadrada, $b^2 - 4ac$) es un cuadrado perfecto. Por otro lado, si el discriminante es negativo, las soluciones involucran números que en su día se llamaron «imaginarios». Tales números, que hoy reciben el nombre de complejos, ocupan un lugar central en la matemática y la ciencia modernas.

Comencemos por definir un número, al que llamaremos i, que satisfaga $i^2 = -1$. Vemos aquí un ejemplo del poder de los matemáticos: podemos decretar ese género de cosas, en cierto modo similares al bíblico «hágase la luz». Una vez formulado el decreto, sin embargo, comienza un trabajo más serio. Debemos asegurarnos de que no hemos creado un caos absoluto.

¿Qué podemos construir con la raíz «imaginaria» de –1? Podemos escribir números de la forma $x + yi$, donde x e y denotan números reales. Estos nuevos números pueden sumarse: la adición de $x + yi$ y $x' + y'i$ nos da como resultado $(x + x') + (y + y')i$; es decir, otro número perteneciente a la misma clase. Y también podemos multiplicarlos: al desarrollar el producto $(x + yi)(x' + y'i)$, obtenemos $xx' + (xy' + x'y)i + yy'i^2$; dado que $i^2 = -1$, este resultado toma la forma $(xx' - yy') + (xy' + x'y)i$. Vemos, pues, que el conjunto de los números complejos se muestra estable frente a las operaciones de suma y multiplicación. También al restar o dividir dos números complejos el resultado sigue perteneciendo al conjunto.

La importancia de los números complejos se debe a que guardan una relación clave con las ecuaciones polinómicas. Esta puede expresarse como sigue: toda ecuación polinómica con coeficientes complejos tiene tantas soluciones complejas como el grado de la ecuación. Nótese que la diferencia con los números reales es abismal. Existen ecuaciones polinómicas con coeficientes reales que, no obstante, carecen de soluciones reales; por ejemplo, $x^2 + 1 = 0$ no posee ninguna solución real. Sin embargo, una vez que introducimos los números complejos, todas las ecuaciones tienen solución. En el ejemplo anterior, estas vendrían dadas por las dos raíces cuadradas de –1: i y $-i$.

Hasta ahora hemos considerado las soluciones de las ecuaciones de primer y segundo grado. Podemos preguntarnos si, para los polinomios de grado superior, existen también fórmulas explícitas que nos permitan calcular sus soluciones como una función de los coeficientes. En el caso de los polinomios de tercer y cuarto grado sí existen tales fórmulas. Fueron descubiertas en el siglo XVI por los matemáticos italianos Girolamo Cardano, Tartaglia (apodo de Niccolò Fontana) y Ludovico Ferrari; no obstante, presentan un aspecto más complicado y requieren el uso de raíces cúbicas y cuartas.

En el siglo XIX, el matemático noruego Niels Abel descubrió que no existía ninguna fórmula general que diese cuenta de las soluciones de una ecuación de quinto grado. Uno de los logros más célebres de Galois fue entender por qué.

Dada una ecuación polinómica, Galois introdujo el grupo formado por las permutaciones de sus raíces (soluciones) que satisfacen las mismas relaciones algebraicas que dichas raíces. Supongamos que dos soluciones de una ecuación, a y b, son tales que satisfacen la relación $a + b^2 = 1$. En tal caso, sus imágenes bajo una permutación del grupo mencionado, a' y b', también deberán cumplir la relación análoga: $a' + (b')^2 = 1$. Hoy dicho grupo recibe el nombre de grupo de Galois de la ecuación considerada.

Galois demostró que las soluciones de una ecuación polinómica pueden escribirse en forma de radicales (raíces cuadradas, cúbicas, etcétera) si y solo si el grupo de Galois de dicha ecuación posee cierta estructura: ha de ser *resoluble*. En particular, si el grupo de Galois no es resoluble, resulta imposible expresar sus soluciones por medio de una fórmula construida con radicales.

CONGRUENCIAS Y CUERPOS FINITOS

Consideremos ahora otro de los descubrimientos de Galois: los cuerpos finitos. Este hallazgo constituía el objeto de una nota de unas 10 páginas publicada en 1830 y que llevaba por título «Sobre la teoría de números». En ellas, Galois se proponía combinar la teoría de las ecuaciones polinómicas con la de las congruencias. Recordemos en qué consiste esta última.

Entre los textos matemáticos más antiguos se encuentra el *Sunzi suanjing*, una obra china que data del siglo v y en la que se propone el siguiente problema: «Tenemos un número desconocido de cosas. Si las contamos de tres en tres, nos sobrarán dos; si las contamos de cinco en cinco, nos quedarán tres; y si las contamos de siete en siete, restarán dos. Hállese cuántas cosas tenemos».

Traduzcámoslo a la jerga moderna. Nuestra incógnita es un número entero al que llamaremos x. El problema nos indica que x es igual a 2 más un múltiplo (desconocido) de 3; a 3 más algún múltiplo de 5; y a 2 más algún múltiplo de 7. Para abreviar estas consideraciones, los matemáticos emplean el término *congruencia*: así, decimos que x es congruente con 2, módulo 3; con 3, módulo 5; y con 2, módulo 7. Estas relaciones se escriben:

$$x \equiv 2 \pmod 3\,,$$
$$x \equiv 3 \pmod 5\,,$$
$$x \equiv 2 \pmod 7\,.$$

Los enteros 3, 5 y 7 reciben el nombre de *razón* de la congruencia.

El *Sunzi suanjing* explica cómo resolver esas ecuaciones de congruencias; es decir, cómo hallar los números enteros x que las verifican. Este «teorema chino del resto», como a veces se le denomina, nos dicta que debemos sumar 2×70, 3×21 y 2×15 (que da como resultado $140 + 63 + 30 = 233$) y restar al resultado 105 hasta obtener el menor número positivo. Al hacerlo, hallamos que la solución es $x = 233 - 2 \times 105 = 23$.

En dicha formula, los números 70, 21 y 15 se deben a que 70 es múltiplo de 5 y de 7 y, al mismo tiempo, congruente con 1 módulo 3 (ya que $70 = 1 + 69 = 1 + 3 \times 23$); 21 es múltiplo de 3 y de 7, y congruente con 1 módulo 5; y 15 es múltiplo de 3 y de 5, a la vez que congruente con 1 módulo 7. Por último, $105 = 3 \times 5 \times 7$. En nuestro ejemplo, x es congruente con 23, módulo 105: tres relaciones de congruencias con módulos 3, 5 y 7 se han transformado en una sola, cuya razón viene dada por el producto de las tres razones previas.

El desarrollo del álgebra nos ha permitido entender que, en el cálculo de congruencias, podemos ignorar el múltiplo indefinido y calcular como si la razón no existiese. Por ejemplo, módulo 13, $6 \equiv -7$, ya que $6 - (-7) = 13 \equiv 0 \pmod{13}$; de la misma forma, $5 \times 7 = 35 = 3 \times 13 - 4 \equiv -4 \pmod{13}$. Ello nos permite simplificar las ecuaciones en congruencias. La ecuación $3x - 5 \equiv 0 \pmod 7$ puede transformarse, multiplicando por 2, en $6x - 10 \equiv 0 \pmod 7$; y como $6 \equiv -1 \pmod 7$ y $-10 \equiv -14 + 4 \equiv 4 \pmod 7$, la ecuación original resulta equivalente a $-x + 4 \equiv 0 \pmod 7$, o $x \equiv 4 \pmod 7$.

Por otro lado, el cálculo de congruencias conlleva ciertas sutilezas. Por ejemplo, ni 2 ni 3 son nulos módulo 6; sin embargo, su producto sí que lo es. Dicho de otra forma, en el cálculo de congruencias, el producto de dos números puede ser 0 sin que lo sea ninguno de los factores.

Esa propiedad de aspecto patológico no se presenta cuando la razón coincide con un número primo (un entero positivo que solo es divisible por sí mismo y por la unidad). Desde Euclides, sabemos que el producto de dos enteros no puede ser múltiplo de un número primo salvo que uno de los factores lo sea. Por esta razón, las congruencias módulo p, donde p representa un número primo, revisten un carácter mucho más fundamental que el resto.

Con el desarrollo de la teoría de ecuaciones y la teoría de números, nació poco a poco la teoría de ecuaciones en congruencias cuyo módulo es un número primo. El genial matemático alemán Carl Friedrich Gauss estudió durante largo tiempo el problema en el que, en palabras del propio Galois, debe resolverse una ecuación considerando que todos los múltiplos de un número primo dado son nulos.

¿Cómo resolveríamos la ecuación de la proporción áurea, $x^2 - x - 1 = 0$, módulo 7 o módulo 11? Podemos comenzar razonando como en una ecuación algebraica clásica. Módulo 7, podemos escribir $0 = x^2 - x - 1 \equiv x^2 - 8x - 1 \equiv (x - 4)^2 - 17 \equiv$

¿Qué es un cuerpo?

Un cuerpo se define como un conjunto de elementos a, b, c, ... dotado de una operación de suma (+), otra de multiplicación (×) y dos elementos especiales, llamados 0 y 1, los cuales deben satisfacer las siguientes propiedades:

- $a + b = b + a$ (propiedad conmutativa de la suma);
- $(a + b) + c = a + (b + c)$ (propiedad asociativa de la suma);
- para todo a, $a + 0 = a$ (elemento neutro con respecto a la suma);
- para todo a, existe un elemento b tal que $a + b = 0$; dicho elemento b suele designarse como $-a$;
- $(a \times b) \times c = a \times (b \times c)$ (propiedad asociativa de la multiplicación);
- $a \times 1 = 1 \times a = a$ (elemento neutro con respecto a la multiplicación);
- para todo a distinto de 0, existe un elemento b tal que $a \times b = b \times a = 1$; dicho elemento b suele designarse como $1/a$ o a^{-1};
- $(a + b) \times c = a \times c + b \times c$ (propiedad distributiva de la multiplicación con respecto a la suma).

Gracias a estas propiedades, podemos definir la resta como $a - b = a + (-b)$, y la división por un elemento b distinto de 0 como $a/b = a \times b^{-1}$. Para todo elemento a del cuerpo, se cumple además que $a \times 0 = 0$ y $a \times (-1) = -a$.

Algunos ejemplos de cuerpo son el conjunto de los números racionales, el de los números reales y el de los complejos. Todos ellos contienen un número infinito de elementos. Sin embargo, podemos también construir cuerpos con un número finito de ellos.

Por ejemplo, los elementos {0, 1} constituyen un cuerpo si las operaciones de suma y multiplicación se definen tal y como indica la tabla adjunta (de todas esas operaciones, $1 + 1 = 0$ es la única que no se sigue de los axiomas precedentes). La numeración binaria y la informática han otorgado a este cuerpo un papel fundamental en nuestros días.

+	0	1
0	0	1
1	1	0

×	0	1
0	0	0
1	0	1

En general, si n denota un número entero igual o mayor que 2, podemos intentar construir un cuerpo con el conjunto $\{0, 1, ..., n - 1\}$ definiendo la adición (o la multiplicación) de dos números como el resto que resulta al dividir su suma (o producto) entre n. Este procedimiento da lugar a un *anillo*. La única propiedad que falta para tener un cuerpo es que todo elemento distinto de 0 posea un inverso. Si (y solo si) n es un número primo, el conjunto $\{0, 1, ..., n - 1\}$ definido con estas operaciones corresponde a un cuerpo. Carl Friedrich Gauss estudió en detalle estas construcciones en sus *Disquisiciones aritméticas*, de 1798.

$(x - 4)^2 - 3$ (mod 7). Para que esta ecuación tuviese una solución entera, haría falta que 3 fuese un cuadrado perfecto, módulo 7. Pero todos los cuadrados perfectos módulo 7 son 0, 1, $2^2 = 4$, $3^2 = 9 \equiv 2$, $4^2 \equiv (-3)^2 \equiv 2$, $5^2 \equiv (-2)^2 \equiv 4$ y $6^2 \equiv (-1)^2 \equiv 1$. En particular, vemos que 3 no es un cuadrado perfecto módulo 7, por lo que la ecuación de la proporción áurea carece de soluciones en congruencias módulo 7.

Módulo 11, sin embargo, podemos escribir $0 = x^2 - x - 1 \equiv x^2 - 12x - 1 \equiv (x - 6)^2 - 37 \equiv (x - 6)^2 - 4$ (mod 11). Así, $(x - 6)^2 \equiv 4 \equiv 2^2$, de donde podemos deducir que $x - 6 \equiv \pm 2$. Por tanto, la ecuación de la proporción áurea tiene dos soluciones módulo 11: $x = 4$ y $x = 8$.

ECUACIONES POLINÓMICAS Y CONGRUENCIAS

Mientras que sus predecesores se contentaron con encontrar las soluciones enteras a las ecuaciones polinómicas en congruencias, Galois se interesó por la clase de números que pueden definirse a partir de las soluciones de una congruencia polinómica; es decir, siguiendo los mismos pasos que cuando definimos los números complejos a partir de la solución «imaginaria» de la ecuación $x^2 + 1 = 0$.

Galois consideró una razón dada por un número primo p, así como un polinomio arbitrario $F(x)$ de grado d y coeficientes enteros. Para proceder con seguridad, necesitamos que el polinomio $F(x)$ satisfaga dos condiciones: por una parte, el coeficiente del término en x^d no puede ser múltiplo de p; por otra, el polinomio no puede ser factorizable módulo p. Esta última condición quiere decir que no pueden existir dos polinomios $F_1(x)$ y $F_2(x)$ tales que $F(x) \equiv F_1(x)F_2(x)$ (mod p). Galois llamó a estas congruencias *irreducibles*. Por ejemplo, tomando $p = 13$, el polinomio $F(x) = x^2 + 1$ no es irreducible, ya que $F(x) \equiv (x - 5)(x - 8)$ (mod 13). Sin embargo, puede verificarse que el mismo polinomio sí es irreducible módulo $p = 11$. Con $p = 13$, podríamos tomar el polinomio $x^2 - 2$; y con $p = 7$, $x^2 - x - 1$.

Antes introdujimos el símbolo i para denotar una de las raíces de la ecuación $x^2 + 1 = 0$. Aquí procederemos de modo similar y trataremos el parámetro x no como una incógnita, sino como una de las soluciones de la ecuación $F(x) \equiv 0$ (mod p). Ello nos permite definir un conjunto de p^d números de la forma:

$$a_0 + a_1 x + \ldots + a_{(d-1)} x^{(d-1)},$$

donde $a_0, \ldots, a_{(d-1)}$ denotan números enteros entre 0 y $p - 1$. (Dado que existen p valores posibles para cada uno y disponemos de d coeficientes, tenemos un total de p^d posibilidades.)

Podemos sumar y restar los números que acabamos de definir; para ello, basta con sumar o restar entre sí los coeficientes de tipo $a_0, a_1, \ldots$, etcétera. Pero lo que quizá resulte más sorprendente es que también podemos multiplicar tales números. Al desarrollar el producto de dos números de la forma $a_0 + \ldots + a_{(d-1)} x^{(d-1)}$, obtendremos términos con potencias de x mayores que $d - 1$, que en principio no forman parte del conjunto de números que hemos definido. Sin embargo, las relaciones de congruencia $F(x) \equiv 0$ (mod p) nos permiten reemplazar las potencias $x^d, x^{d+1}, \ldots$, por una potencia admisible.

Por ejemplo, si partimos de la ecuación $x^3 + 2x - 1 \equiv 0$ (mod 5), tendremos que $x^4 + 2x^2 - x \equiv 0$ (mod 5) y, por tanto, que $x^4 \equiv -2x^2 + x \equiv 3x^2 + x$ (mod 5). A partir de aquí, también podemos deducir que $x^5 \equiv 3x^3 + x^2 \equiv 3(3x + 1) + x^2$ (donde hemos usado que $x^3 \equiv 3x + 1$), lo que nos permite escribir $x^5 \equiv x^2 + 9x + 3 \equiv x^2 + 4x + 3$ (mod 5), etcétera. Por último, la condición de que la congruencia sea irreducible nos permite dividir entre cualquier número diferente de cero.

De esta forma obtenemos un conjunto de p^d números con los que podemos operar de forma natural: disponemos de una suma, una resta, una multiplicación y una división, las cuales respetan las reglas tradicionales (la suma y la multiplicación son conmutativas y asociativas, y tenemos una ley distributiva de la multiplicación sobre la adición). En matemáticas, un conjunto de elementos que satisfacen

La suma en una curva elíptica

Las curvas elípticas nada tienen que ver con la forma de una elipse; su nombre se debe a que las ecuaciones que las definen guardan cierta relación con el cálculo de la longitud de un arco de elipse. Una curva elíptica E queda definida por una ecuación de la forma $y^2 = x^3 + ux + v$, donde u y v denotan números reales que deben satisfacer $4u^3 + 27v^2 \neq 0$ (en caso contrario, la curva no es regular).

Las curvas elípticas permiten definir una operación suma entre sus puntos. La suma de dos puntos P y Q de la curva elíptica E se define de la siguiente manera: si la recta que pasa por P y Q corta la curva elíptica en otro punto R', entonces el punto $R = P + Q$ es el simétrico de R' con respecto al eje horizontal. Si la recta que pasa por P y Q es vertical, consideramos que el punto R' se encuentra en el infinito, el cual se corresponde con el elemento neutro de la adición (el 0). Por último, cuando P y Q son iguales, debe emplearse la recta tangente a la curva elíptica en P para definir $R = P + P$. Puede demostrarse que la suma de tres puntos P, Q y R es 0 si y solo si están alineados.

Debido a esas propiedades, el conjunto de puntos de una curva elíptica forma un grupo aditivo (una estructura algebraica dotada de una operación que cumple la propiedad asociativa, posee un elemento neutro y es tal que a todo elemento a puede asociarse un inverso a' que satisface $a + a' = 0$).

También podemos considerar curvas elípticas sobre un cuerpo F distinto de los reales. En tal caso, los parámetros u y v se eligen como elementos de F, y el grupo $E(F)$ de puntos de la curva elíptica queda formado por las soluciones (x,y) de la ecuación $y^2 = x^3 + ux + v$ cuando esta se considera en el cuerpo F y se añade el punto del infinito.

Las curvas elípticas desempeñaron un papel clave en la demostración publicada en 1995 por el matemático Andrew Wiles del último teorema de Fermat, el cual afirma que no existen números enteros positivos a, b y c tales que $a^n + b^n = c^n$ para n mayor que 2.

tales propiedades recibe el nombre de *cuerpo*. Y dado que, en este caso, nuestro conjunto solo posee un número finito de elementos, se trata de un cuerpo finito.

En sus notas, Galois desarrolla las propiedades de los cuerpos finitos. Comienza demostrando que, en un cuerpo finito de p^d elementos, todo elemento a satisface que $a^{(p^d)} = a$, lo que generaliza la congruencia clásica conocida como «pequeño teorema de Fermat», según la cual $a^p \equiv a \pmod{p}$ para todo entero a y todo número primo p. Galois también demostró la existencia de una *raíz primitiva* de la ecuación $a^{(p^d)} = a$; es decir, un elemento distinto de cero tal que la serie 0, 1, a, a^2, ..., $a^{(p^d-2)}$ enumera todos los elementos del cuerpo finito.

Para construir un cuerpo finito de cardinal p^d (es decir, con p^d elementos) a partir del método descrito por Galois, hace falta comenzar con un polinomio $F(x)$ de grado d que sea irreducible módulo p. Galois demuestra que dicho polinomio debe ser, módulo p, un factor del polinomio $x^{(p^d)} - x$. Algo más tarde, el matemático y astrónomo francés Joseph Serret halló la manera de encontrar dicho factor, de modo que para cada potencia p^d de un número primo p existe un cuerpo finito de cardinal p^d. Dicho polinomio es además único, en el sentido de que si obtenemos dos cuerpos finitos del mismo cardinal (por ejemplo, a partir de dos polinomios de Galois distintos, $F_1(x)$ y $F_2(x)$), existe un «diccionario» que relaciona de manera unívoca cada elemento de un cuerpo con un elemento del otro, al tiempo que preserva las mismas reglas de cálculo (cuando dos conjuntos satisfacen tales propiedades, decimos que son *isomorfos*).

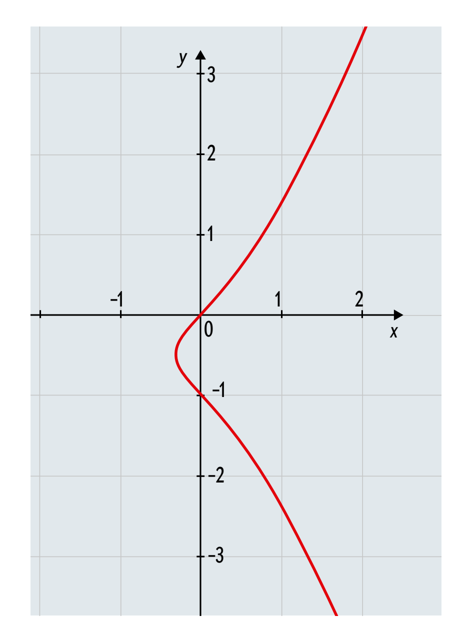
DE LOS CUERPOS FINITOS A LA CRIPTOGRAFÍA

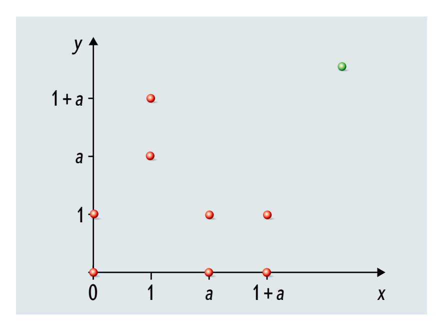
Durante las décadas siguientes a los trabajos de Galois, los matemáticos completaron sus ideas y formalizaron la noción de cuerpo (*véase el recuadro* «¿Qué es un cuerpo?»). En 1863, el matemático alemán Richard Dedekind publicó un capítulo hasta entonces inédito de las *Disquisiciones aritméticas* de Gauss, en el que el matemático alemán desarrollaba una teoría similar a la concebida por Galois.

La teoría de los cuerpos finitos halló muy pronto su utilidad en matemáticas. En la actualidad constituye una herramienta clave incluso en algunos dominios que no guardan ninguna relación aparente con la aritmética, como la teoría de funciones automorfas y el programa de Langlands (una serie de conjeturas técnicas que involucran el álgebra, la teoría de funciones y la teoría de números).

La teoría de cuerpos finitos desempeña también una función de gran importancia en las telecomunicaciones modernas y en el funcionamiento de Internet; en particular, en lo que concierne a la seguridad del comercio electrónico. Cuando adquirimos un producto por Internet, llega un momento en que debemos introducir el número de nuestra tarjeta de crédito. A todos nos gustaría estar seguros de que esos datos quedan fuera del alcance de cualquier persona no autorizada, lo cual nos sitúa ante el problema clásico de la criptografía: cómo transmitir un mensaje de forma que solo el destinatario pueda descifrar su significado.

Hasta 1975, los únicos procedimientos criptográficos que se empleaban eran simétricos. Tanto el emisor como el destinatario debían acordar una clave, la cual se empleaba tanto para cifrar como para descifrar el mensaje. En sus *Vidas de los doce césares*, el historiador romano Suetonio escribe a propósito de Julio César: «Usaba, para las cosas más secretas, una especie de cifra que hacía el sentido ininteligible, estando dispuestas las letras de tal modo que no podía distinguirse palabra alguna. Esta consistía, lo digo para aquellos que deseen descifrarlas, en cambiar el orden de las letras del alfabeto, tomando la cuarta por la primera; esto es, la *d* por una *a*, y así las demás». Como bien indica Suetonio, si conocemos el método empleado por Julio César para cifrar el texto, también sabremos como descifrarlo.





CURVAS Y CUERPOS FINITOS: **La ecuación de una curva plana adopta la forma general $f(x,y) = 0$. Por ejemplo, $y^2 + y = x^3 + x^2 + x$ describe la curva mostrada aquí (*izquierda*). Sin embargo, tales ecuaciones no tienen por qué definirse sobre el cuerpo de los números reales, sino que pueden referirse también a un cuerpo finito. Así, al considerar el cuerpo de $4 = 2^2$ elementos ($p = 2$, $d = 2$) formado por los polinomios 0, 1, a y $1 + a$ (con las operaciones $1 + 1 = 0$ y $a^2 = a + 1$), la misma curva posee 8 puntos (*arriba*), además del punto 0 en el infinito (*verde*).**

Sin embargo, esa clase de mecanismos no resultan demasiado útiles para el comercio electrónico, ya que un sitio web no puede ponerse en contacto con cada uno de sus potenciales clientes para acordar una clave secreta. Para solucionar esa clase de problemas, en 1976 los estadounidenses Whitfield Diffie, Martin Hellman y Ralph Merkle propusieron un nuevo procedimiento, hoy conocido como criptografía asimétrica.

En la criptografía asimétrica no importa quién pueda cifrar un mensaje; sin embargo, solo el destinatario puede descifrarlo. Este posee dos claves: una es conocida por todos y permite cifrar los mensajes; la otra, la que se emplea para descifrarlos, solo queda a disposición del destinatario. En 1978, los investigadores Ronald Rivest, Adi Shamir y Leonard Adleman, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, desarrollaron un protocolo de tales características. Conocido con el nombre de RSA, hoy su uso se encuentra ampliamente extendido.

Desde un punto de vista matemático, podemos pensar en la criptografía como en un sistema que incluye dos conjuntos de símbolos, uno para los mensajes y otro para los mensajes cifrados. Estos se hallan relacionados por dos funciones: una que transforma los símbolos inteligibles en símbolos cifrados, y otra que ejecuta el proceso inverso. En la clave empleada por Julio César, ambos conjuntos constan de las letras del alfabeto.

La función que cifra un mensaje cambia cada letra por la que se encuentra tres posiciones más a la izquierda, y la función que los descifra los desplaza tres lugares hacia la derecha.

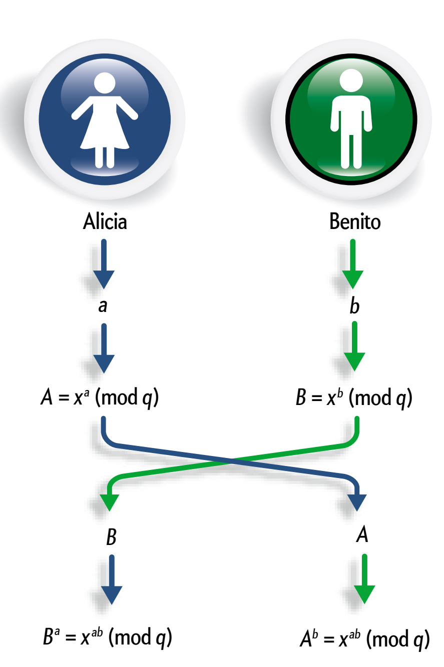
Para obtener un protocolo asimétrico práctico y fiable, la función que cifra los mensajes debe poder aplicarse con rapidez; al mismo tiempo, la función que los descifra ha de ser muy difícil de calcular si se ignora la clave, por más que conozcamos la función de cifrado. En el caso de una generalización de la clave empleada por Julio César, podríamos considerar una permutación de las letras del abecedario algo más sutil que una simple traslación. Sin embargo, para saber a qué letra de origen corresponde una letra cifrada, bastarían poco más de 20 intentos (el número de letras del alfabeto).

No obstante, cuando el número de mensajes posibles es muy elevado (por ejemplo, del orden de 10^{100}), resulta inviable intentar todos los cifrados posibles esperando dar antes o después con el mensaje en clave. En este contexto, el álgebra supone una gran ayuda, ya que una fórmula compacta siempre proporciona una manera económica de trabajar con aplicaciones entre conjuntos de gran tamaño. Como veremos, los cuerpos finitos aparecen aquí de manera natural.

Siguiendo las ideas de Diffie y Hellman, veamos cómo dos individuos, Alicia y Benito, pueden acordar un código secreto a prueba de espías. A tal fin, nuestros amigos eligen un cuerpo finito de cardinal q y con raíz primitiva x (es decir, tal que la serie 0, 1, x, x^2, ..., $x^{(q-2)}$ describa todos los elementos del cuerpo).

Cómo calcular potencias con rapidez

Existe un algoritmo recursivo que nos permite calcular de forma muy rápida una potencia entera x^a de un número x. Este se basa en la representación binaria del número a y en el hecho de que $x^a = (x^2)^{(a/2)}$ si a es par, y $x^a = x(x^2)^{(a-1)/2}$ si a es impar. Ello nos permite escribir, por ejemplo, $x^{19} = x(x^2)(x^{16})$, una cantidad que puede calcularse con solo 6 multiplicaciones, ya que $x^{16} = (((x^2)^2)^2)^2$. En general, si n denota el número de cifras de la representación binaria de a, este método nos proporciona un algoritmo para calcular x^a en unos $2n$ pasos.



CIFRADO SEGURO: Si Alicia y Benito eligen sendos números enteros lo suficientemente grandes, a y b, podrán intercambiar un mensaje secreto de forma segura. Dicho mensaje queda representado por x^{ab} (mod q), donde q es el cardinal de un cuerpo finito y x una raíz primitiva de dicho cuerpo. Aunque los valores de x y q sean públicos, un espía que haya interceptado los mensajes transmitidos ($A = x^a$ o $B = x^b$) no podrá reconstruir con facilidad el mensaje secreto (x^{ab}).

Alicia y Benito deben comenzar escogiendo un número entero entre 1 y $q - 1$, el cual guardarán en secreto. Llamemos a al número elegido por Alicia y b al seleccionado por Benito. Ahora, Alicia transmite a Benito el número x^a, mientras que Benito le comunica a Alicia el número x^b. En este punto, conviene recordar que x^a puede calcularse de forma eficiente (*véase el recuadro* «Cómo calcular potencias con rapidez»). Después, Alicia calcula $(x^b)^a$ en el cuerpo finito, mientras que Benito hace lo propio con $(x^a)^b$. De esta manera, cada uno de ellos puede calcular el número x^{ab}, que será su secreto común.

Ahora imaginemos que Carlos ha logrado espiar todas las comunicaciones entre Alicia y Benito, gracias a lo cual conoce los números x, x^a y x^b. La seguridad del protocolo radica en que, aun con esos datos en la mano, resulta muy difícil calcular x^{ab}.

Una posible solución consistiría en hallar el valor de a a partir del de x^a. Este método recibe el nombre de problema del logaritmo discreto, ya que se trata de calcular el logaritmo en base x de x^a. ¿Cómo hallarlo? Una técnica consistiría en calcular las potencias sucesivas x^2, x^3, etcétera, hasta que una de ellas nos dé x^a. Sin embargo, si a es lo suficientemente elevado, encontrar el número que buscamos llevaría una eternidad, lo que en la práctica convierte al problema en irresoluble. Existen, no obstante, otros métodos más eficaces, los cuales nos obligan a escoger q de tal modo que la descomposición de $q - 1$ posea al menos un factor primo muy grande.

Una manera de incrementar la seguridad del protocolo consiste en reemplazar el cuerpo finito por una estructura algebraica algo más compleja: una curva elíptica definida sobre un cuerpo finito. Para ello, elegimos un cuerpo finito F lo suficientemente grande, una curva elíptica E (definida por una ecuación cuyos coeficientes pertenecen a F) y un punto P sobre dicha curva (cuyas coordenadas pertenecen a F). La utilidad de las curvas elípticas radica en que podemos definir una suma entre sus puntos. Al igual que en el caso anterior, Alicia y Benito eligen sendos números enteros, a y b, y cada uno calcula el punto de la curva aP y bP. Ahora, el secreto común es el punto $(ab)P$ sobre la curva E.

Los protocolos descritos, hoy habituales en los sistemas de comunicaciones, se deben en última instancia a la obra de Galois. Pero la herencia de este genio precoz no se reduce a las aplicaciones criptográficas. Hoy en día, la teoría de Galois se ha convertido en un edificio complejo que empapa numerosas áreas de la matemática; entre ellas, la teoría de números, la de ecuaciones diferenciales, la geometría analítica, el programa de Langlands e incluso la célebre demostración del último teorema de Fermat.

PARA SABER MÁS

La breve vida de Évariste Galois. Tony Rothman en *Grandes matemáticos*. Colección *Temas de Investigación y Ciencia*, n.º 1, 2005.

Algèbre corporelle. Antoine Chambert-Loir. Éditions de l'École Polytechnique, 2005.

Abel, Galois et les équations algébriques. P. Pesic en *Pour la Science*, n.º 366, abril de 2008.

Évariste Galois: La fabrication d'une icône mathématique. Caroline Ehrhardt. Éditions de l'EHESS (Escuela Avanzada de Estudios en Ciencias Sociales de Francia), octubre de 2011.



LAS ESCUELAS PARA CIEGOS de la India han ayudado a encontrar niños que cumplen los requisitos para recibir el tratamiento quirúrgico de corrección de la visión.



MEDICINA

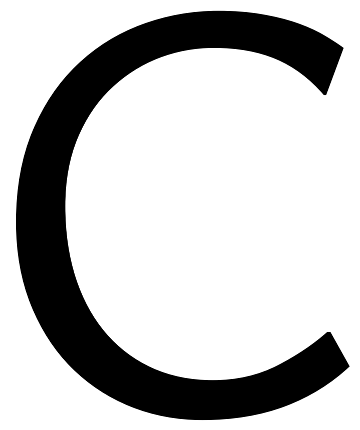
VER POR PRIMERA VEZ

LA CIRUGÍA DOTA DE VISIÓN A NIÑOS CIEGOS DE LA INDIA Y REVELA LOS MECANISMOS CEREBRALES DE ESTE SENTIDO

Pawan Sinha

Pawan Sinha, profesor de neurociencia computacional y de la visión en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, estudia los mecanismos y principios que emplea el cerebro para reconocer objetos y escenas.





Cerca de la puerta de nuestra casa en Nueva Delhi mi madre solía guardar monedas en un pequeño cuenco de cristal azul. Cuando salía, tomaba unas cuantas para dar limosna a los pobres con que se encontraba inevitablemente en las calles de la ciudad. Dado lo rápido que uno se insensibiliza ante la abundante miseria humana que hay en la India, siempre me impresionó su inquebrantable fidelidad a este ritual.

Nadie usó el cuenco durante los meses que mi madre luchaba contra el cáncer. Cuando volví a la India en 2002, un año después de su muerte, me di cuenta de que era una de las pocas pertenencias de ella que mi padre había guardado. En aquel momento no fui consciente de cómo aquello iba a cambiar mi vida.

Una tarde de invierno durante mi visita, cuando salía de casa para ver a un amigo, tomé unas cuantas monedas del cuenco y las introduje en mi bolsillo. Hacía un frío terrible, por lo que me alegré de encontrar un taxi cuyas ventanillas se cerraban del todo, algo no siempre fácil en Nueva Delhi. Después de unos minutos, el taxi se paró en un cruce. De modo sorprendente, había muy poco tráfico y pude ver una pequeña familia acurrucada a un lado de la carretera. Saqué las monedas, bajé la ventanilla y les hice una señal.

Se dirigieron lentamente hacia mí, con los dos niños agarrados al sari de la mujer. Resultaba desgarrador ver a los menores descalzos y desnutridos vestidos con trapos de algodón. Y lo que agravó aún más mi malestar, me di cuenta de que los niños, de unos seis o siete años de edad, eran además ciegos. Mientras la familia temblaba a la intemperie, pude ver las cataratas en los ojos de los pequeños. Me sorprendió mucho, porque hasta entonces solo había visto cataratas en gente mayor. El semáforo se puso verde. Deposité las monedas en la mano de la madre y vi desaparecer a la familia mientras el taxi se alejaba. Las caras de los niños me persiguieron durante varios días. Traté de informarme tanto como pude sobre la ceguera infantil en la India. Lo que leí fue impactante.

El país cuenta con una de las poblaciones más numerosas de niños ciegos, en torno a 400.000. Esta incapacidad, asociada a la extrema pobreza, limita sobremanera su calidad de vida; además, conlleva una mortalidad terriblemente elevada. La Organización Mundial de la Salud estima que hasta un 60 por ciento de los niños mueren el primer año en que se quedan ciegos. Menos del 10 por ciento de los afectados recibe educación. Para las niñas, la perspectiva es aún peor. Muchas son confinadas en casa y sufren abusos físicos y sexuales.

Estas angustiosas cifras me parecieron aún más perturbadoras cuando leí que una gran parte de este sufrimiento podía evitarse; la ceguera podía tratarse o prevenirse en casi un 40 por ciento de los niños. Muchos jóvenes, sin embargo, jamás reciben atención sanitaria porque los centros médicos se concentran en las ciudades más importantes, mientras que cerca del 70 por ciento de la población de la India vive en aldeas. Tales circunstancias suponen que un niño ciego de una familia rural con dificultades económicas con toda probabilidad se verá destinado a una vida oscura y trágicamente corta.

Me tomé estas cifras con cierta incredulidad. Después de todo, yo había crecido en la India. ¿Cómo no me habría enterado nunca de ese problema? ¿Cómo podían tales cosas ir tan en contra del mito popular del país, una emergente superpotencia

EN SÍNTESIS

La India posee una de las poblaciones más numerosas de niños ciegos, en torno a 400.000. Muchos de ellos no reciben educación y las niñas se convierten a menudo en víctimas de abusos físicos y sexuales.

Como neurocientífico, el autor decidió ayudar a ver a niños y jóvenes adultos afectados por cataratas, a una edad en la que se consideraba imposible el desarrollo de la visión.

La cirugía resultó a menudo efectiva, incluso en algunos pacientes con más de 20 años de edad. También permitió ahondar en el funcionamiento del sistema visual.

PÁGINAS ANTERIORES: EILEEN HOHMUTH-LEMONICK

Ensamblando un nuevo mundo visual

Cuando los niños y los jóvenes del Proyecto Prakash ven el mundo por primera vez, les resulta difícil ensamblar las partes de una escena en un conjunto que posea un sentido. Una fotografía de chicas bailando sirve para ilustrar los problemas que aparecen. El sistema visual debe organizar fragmentos de color, brillo y textura para formar objetos coherentes. La ilustración del centro representa la localización de esos elementos tan diversos. El progreso se produce cuando un grupo de objetos estáticos, con bordes definidos (*derecha*), comienza a moverse. El cerebro integra los pasos rítmicos y los brazos levantados en la percepción de una sola entidad global, la forma de los cuerpos de las bailarinas.



CORTESÍA DE PROJECT PRAKASH

económica? Decidí hacer otro viaje a la India. Visité pueblos de los alrededores de Delhi, en el sureño estado de Andhra Pradesh y en el delta del Ganges en Bengala Occidental. La enorme cantidad de niños ciegos que encontré me convenció de que las estadísticas decían la verdad. Y la extrema pobreza que vi en aquellos pueblos me ayudó a entender por qué muchos de ellos no recibían tratamiento alguno.

La vivencia de aquella tarde invernal en Nueva Delhi marcó el comienzo de un proceso personal que todavía no ha concluido. Me propuse ayudar a esos niños para que pudieran ver. Y como científico, me di cuenta de que hacerlo también brindaba la oportunidad de resolver uno de los grandes desafíos de la neurociencia: ¿cómo aprende a ver el cerebro?

UNA RESPUESTA EN UNA PREGUNTA

Ya en mis tiempos de doctorando en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), esta pregunta me había frustrado y fascinado a la vez. ¿Cómo se organiza la confusión de colores, brillos y texturas que inciden en nuestra retina a cada instante para transformarse, pongamos por caso, en los perfiles de los brazos y el torso de una chica bailando (y el azul y verde que se entrecruzan en su falda de cuadros)?

El método principal para estudiar el desarrollo del sistema visual exige hacer experimentos con niños pequeños. Y aunque ha dado lugar a valiosos resultados, adolece también de importantes deficiencias debido a la dificultad que entrañan los ensayos. El alcance de las preguntas se ve muy limitado por la escasa capacidad de los menores para entender y responder, incluso de mantenerse despiertos durante un largo período. Otro factor que complica aún más el estudio corresponde a los cambios simultáneos en subsistemas cerebrales relacionados pero distintos (como las regiones responsables de la motivación, la atención y el control de los movimientos oculares) que se producen cuando el niño está creciendo.

Teniendo en cuenta tales obstáculos, en el verano de 2002 me encontré lidiando con dos preguntas en apariencia inconexas. ¿Cómo da sentido el cerebro a la información visual? Y con los recuerdos de Nueva Delhi aún frescos, ¿cómo podía ofrecer una cirugía de restauración de la visión a los niños con ceguera congénita?

Todavía recuerdo la emoción que sentí al darme cuenta de que las dos preguntas se complementaban, esto es, una contenía la respuesta de la otra. Seguir el progreso de un niño que comienza a ver podía ayudarnos a entender el aprendizaje visual, y la financiación científica destinada a responder tal enigma podría contribuir al desarrollo de tratamientos. Me maravillé de lo bien que encajaban las dos necesidades y, de un modo un tanto egocéntrico, lo importante que ambas resultaban para mí.

De vuelta al MIT, presenté a mis colegas un plan para desarrollar investigaciones que combinaran esos objetivos científicos y humanitarios. La mayoría se mostraron entusiasmados, pero unos pocos me desaconsejaron embarcarme en tal propósito antes de tener un contrato indefinido. Entendía el riesgo, pero me sentía obligado a seguir adelante con la idea.

Solicité financiación al Instituto Nacional de la Visión de los EE.UU. (parte de los Institutos Nacionales de la Salud, NIH). Temía que una agencia gubernamental de ese país tal vez rechazaría subvencionar operaciones quirúrgicas en la India. Además, la logística del esfuerzo resultaba compleja y faltaban datos preliminares sobre su viabilidad. Pero el comité evaluador vio el potencial científico y humanitario del trabajo y me otorgó una subvención para explorar su factibilidad, noticia que acogí con un enorme entusiasmo.

El siguiente paso consistía en localizar un centro médico en la India donde los niños ciegos pudieran recibir tratamientos quirúrgicos de primer nivel. Destacó un centro oftalmológico: el Hospital Caritativo de la Visión del Dr. Shroff en Nueva Delhi. Este contaba con unas instalaciones pediátricas extraordinarias y sus

médicos acogieron el proyecto como una oportunidad para ayudar a niños ciegos y participar en la investigación.

Todas las piezas estaban sobre la mesa. Solo nos hacía falta un nombre que reflejara la doble misión de aportar luz a la vida de la gente y de arrojar luz sobre cuestiones científicas. No tuve que pensar demasiado. En sánscrito, antigua lengua indoeuropea, *prakash* significa luz. Teníamos un nombre con un atractivo toque de aliteración: Proyecto Prakash.

¿RESULTARÍA ÚTIL LA CIRUGÍA?

Realizamos el proyecto en varias fases. Primero, mediante revisiones oftalmológicas en campamentos montados en zonas rurales, identificamos niños, y en algunos casos incluso adultos jóvenes, que pudieran beneficiarse del tratamiento. Un equipo de optometristas, oftalmólogos y otros trabajadores de la salud examinaron a los niños en busca de problemas de visión (defectos de refracción, o ametropías), infecciones oculares y cegueras tratables (causadas, sobre todo, por cataratas congénitas y daño en la córnea debido a procesos de cicatrización). Los niños elegidos para ser tratados se desplazaron al hospital de Nueva Delhi y allí se les practicó un examen más exhaustivo; este incluía una oftalmoscopia (para ver el fondo del ojo), ecografías oculares y una valoración del estado de salud general y aptitud para la cirugía. Las fechas para las operaciones quirúrgicas se acordaban tras consultar con el tutor del niño.

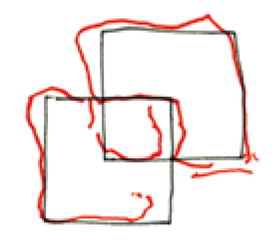
La operación de cataratas en la población infantil resulta mucho más complicada que en la adulta. La cirugía pediátrica requiere anestesia general y un intenso seguimiento médico. El procedimiento consiste en romper el cristalino opaco y endurecido en pequeñas porciones, extirpar estas a través de una pequeña incisión en el borde de la córnea y reemplazar la lente natural dañada por otra sintética. El Proyecto Prakash corre con los gastos, alrededor de 300 dólares, y los niños vuelven para hacerse controles periódicos.

Mientras el trabajo se ponía en marcha, una duda me perturbaba. Me preguntaba si nuestra intervención quirúrgica, aunque bien intencionada, no llegaría demasiado tarde para resultar de alguna utilidad. ¿Habrían superado los niños un período crítico y temprano en la vida que conlleva un uso intenso de los ojos y de los circuitos visuales del cerebro, un intervalo más allá del cual la visión ya no se desarrolla? No se trataba de una idea inverosímil. Un cirujano inglés, William Cheselden, describió en 1728 el primer caso de adquisición tardía de la visión en un niño de trece años que había nacido con cataratas en ambos ojos. El médico observó que el chico sufría una notable discapacidad visual incluso después de la eliminación de las oclusiones.

PRIMERA VISTA

Solo las partes, no el conjunto

Los trazos de un niño que comienza a ver revelan una visión fragmentada de incluso figuras en dos dimensiones. Cada una de las áreas de dos cajas solapadas las percibía por separado, como indican los garabatos rojos. El chico también interpretó los segmentos de una vaca y de una pelota y su sombra (*todo perfilado en verde*) como objetos distintos. Era incapaz, por tanto, de identificar ninguna de estas imágenes.







Algunos estudios comparativos sobre la privación de la vista en animales apuntaban a un panorama igual de deprimente. Torsten Wiesel y David Hubel, ganadores del premio Nobel en 1981, habían descrito en los gatos el claro efecto negativo de la privación visual temprana. Resultaba natural, por tanto, preguntarse por la utilidad de la cirugía al final de la infancia.

Intuí, sin embargo, que los tratamientos merecían la pena. Otorgar excesiva importancia a las viejas observaciones como las de Cheselden suponía un riesgo. Los malos resultados quirúrgicos bien podrían deberse a una lesión en los ojos, producto de las técnicas quirúrgicas toscas, tales como la reclinación (*couching*), un antiguo método para la extirpación de las cataratas. Y la mayoría de los estudios realizados en animales han examinado el cierre por sutura de uno de los ojos, mientras que los niños del Proyecto Prakash presentaban ambos ojos ocluidos. De modo sorprendente, la anomalía en un ojo ejerce peores efectos en la visión que cuando ocurre en ambos ojos a la vez. La posibilidad de adquirir alguna función visual después de un tratamiento contra la ceguera al final de la infancia seguía siendo una pregunta abierta.

AHORA VEMOS

El psicólogo William James describió el mundo perceptivo de un bebé como una «floreciente y frenética confusión» que precede a la maduración del sistema visual. El Proyecto Prakash planteaba la cuestión de si ese período, un complejo bombardeo de color, forma y movimiento, que quizá supone una etapa temprana en el desarrollo visual normal, se produce también en los participantes del proyecto que comienzan a ver, algunos ellos con más de veinte años de edad. ¿Experimenta su sistema visual los pasos anárquicos pero necesarios para organizar de modo coherente las imágenes recibidas? El término «organización» tiene aquí dos significados. Para que una persona «vea», las partes que forman una imagen deben integrarse y dar lugar a objetos nítidos, en un proceso llamado organización intramodal. El segundo requisito, la organización intermodal, hace referencia a la interacción de la visión con otros sentidos.

Nuestra habilidad para dividir una imagen en objetos separados está tan perfeccionada que parece fácil. Abrimos los ojos y el mundo tiene sentido, se nos aparece como un conjunto ordenado de elementos. Sin embargo, la experiencia de los niños de nuestro proyecto que comienzan a ver es diferente, ya que muestran profundas deficiencias. Les resulta imposible organizar diversas regiones de distinto color y brillo en un conjunto más grande. Perciben como cosas independientes numerosas características de objetos corrientes (las secciones solapantes de dos cuadrados

CORTESÍA DE PROJECT PRAKASH

o la parte de una pelota delimitada por un cordón sobre su superficie), y no como componentes de una estructura mayor. Las escenas visuales para una persona que ve por primera vez se asemejarían a un *collage* de múltiples áreas de diferente color y luminosidad desconectadas entre sí, semejante a un cuadro abstracto. Esta excesiva fragmentación perceptual dificulta en gran medida la identificación de objetos enteros.

La incapacidad de los pacientes del proyecto Prakash plantea una pregunta que ha preocupado a los científicos durante casi un siglo: ¿qué rasgos nos permiten, como individuos con visión normal, analizar correctamente imágenes complejas? La respuesta parece hallarse en la manera natural con la que el cerebro organiza los estímulos visuales, conocida como heurísticas de agrupación (denominadas leyes de agrupación de la Gestalt, por la escuela de psicología de principios del siglo xx). Por ejemplo, una regla básica programada en el sistema visual provoca que un conjunto de rayas alineadas en una imagen se consideren parte de un solo grupo, dado que probablemente surjan de los bordes del mismo objeto.

El Proyecto Prakash está ayudando a establecer el panorama de lo que puede conseguirse y lo que no cuando un niño comienza a ver a una edad tardía

Ninguna de esas normas parecía funcionar en los niños que acababan de recuperar la vista, pero con el tiempo se observaban cambios interesantes. Recuerdo vivamente a SK, el primer paciente que nos llevó sobre una nueva pista. Era un hombre de 29 años que conocimos en un pequeño albergue para jóvenes ciegos en las afueras de Nueva Delhi. Un examen rápido reveló que padecía afaquia (de *phakos*, palabra griega para «lente»), una enfermedad infrecuente en la que el niño nace sin cristalino. La capacidad visual de SK se hallaba muy mermada, mucho más de lo que en EE.UU. se considera legalmente ceguera. Se había adaptado a su anomalía caminando con un bastón blanco y estudiando en braille. Sin embargo, todo lo que necesitaba para corregir su afaquia consistía en un par de gafas de 20 dólares que compensara su carencia natural de cristalinos, algo que SK no podía permitirse.

Conseguimos unas de gafas para SK y examinamos su visión. Enseguida nos impactó el hecho de que, contrariamente a nuestras expectativas, SK no pareciera especialmente emocionado con su nueva y mejorada vista. Nuestros exámenes revelaron que su mundo visual consistía en un desconcertante conjunto de regiones de diversos colores e intensidades, con escasa información para juntarlas en entidades coherentes. Incluso los dibujos con trazos simples, tales como un círculo solapado con un cuadrado, los percibía como una serie de piezas encajadas de formas extrañas (a pesar de que ya conociera los conceptos del cuadrado y el círculo a través del tacto). SK dibujaba con dificultad objetos enteros que aparecían en fotografías. Tonalidades y sombras, solapamientos y oclusiones constituían obstáculos insalvables para él; cada región con un tono o una luminosidad diferentes le parecía un ente distinto.

Curiosamente, esta confusa mezcla de regiones cristalizaba en una estructura con sentido cuando se introducía cierto rasgo visual: el movimiento. Las imágenes que resultaban a SK confusas cuando estaban paradas, cobraban significado cuando sus partes constituyentes se movían. Los vídeos de SK inspeccionando una imagen muestran una transformación casi mágica gracias a esa acción.

Seguimos durante varios meses la evolución de SK. Le seguía costando interpretar imágenes estáticas. Justo cuando comenzamos a resignarnos con la idea de que su capacidad para analizar imágenes estuviera afectada para siempre, las cosas cambiaron. Un año y medio después de la intervención inicial, sin ningún otro tipo de entrenamiento que su exposición al mundo visual circundante, SK mejoró notablemente. Lograba analizar imágenes estáticas e incluso expresaba felicidad por sus progresos. Fue un final gratificante para un capítulo que nos había mantenido en un gran suspense.

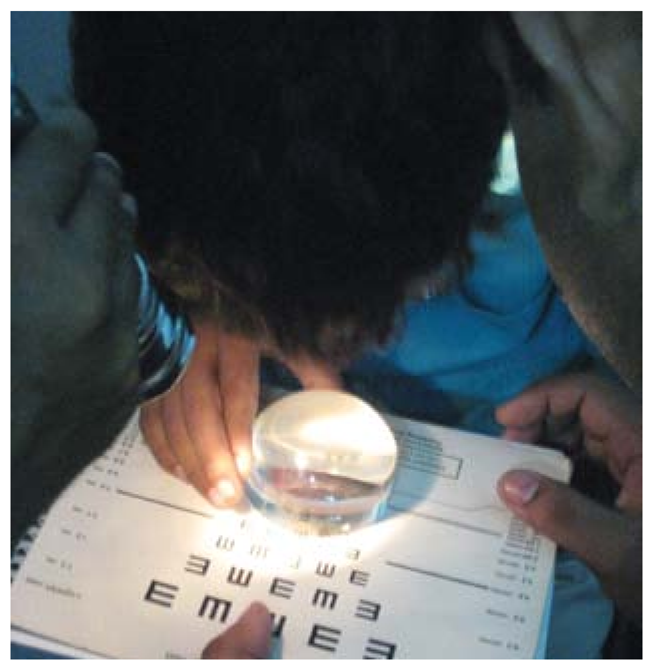
En estudios posteriores realizados con otros pacientes mucho más jóvenes que SK, observamos una recapitulación de su experiencia. Varios meses después de mostrar dificultades en el análisis de las imágenes, comenzaban a organizar las percepciones en objetos coherentes. El tiempo necesario para adquirir tal destreza parece depender de la edad a la que el niño recibe el tratamiento, siendo los más jóvenes los que aprenden más rápido.

¿A qué se debe esta mejora? La teoría sugiere que el movimiento funcionaría como un «instructor», que enseñaría al sistema visual a diseccionar las imágenes incluso cuando fueran estáticas. Con la norma «los elementos que se mueven juntos pertenecen al mismo objeto», el sistema visual aprende en última instancia a agrupar imágenes a través de atributos estáticos como el color o la orientación.

El cerebro, por supuesto, hace mucho más que identificar los componentes de una escena visual. También conecta los ámbitos del sonido, el tacto, el olfato y el gusto, creando un panorama sensorial a través de la organización intermodal. La manera en que la vista se relaciona con otros sentidos ha interesado a filósofos y neurocientíficos durante siglos. En 1688, el científico irlandés William Molyneux escribió al filósofo británico John Locke: «Supongamos que un hombre ciego de nacimiento ha aprendido a través del tacto a distinguir entre un cubo y una esfera del mismo metal... Supongamos que el cubo y la esfera están sobre una mesa, y que el hombre de repente puede ver: la cuestión es si, a través de la vista y sin tocarlos, podrá diferenciar ambas formas y decir a qué corresponde cada cuál».

Locke incluyó la pregunta de Molyneux en la edición de 1692 de su famosa monografía *Ensayo sobre el entendimiento humano*. La consulta de Molyneux se plasmó en una serie de preguntas fundamentales: ¿Cómo conectamos los diferentes sentidos en una percepción unificada de la realidad? ¿Nacemos con este mapa mental del cerebro, o hace falta aprenderlo a través de la experiencia? ¿Podemos adquirirlo en cualquier momento de la vida? El estudio de estas ideas por parte de Locke, George Berkeley, David Hume y otros empiristas ha influido en numerosas cuestiones fundamentales para la neurociencia contemporánea.

Al examinar la capacidad de los niños del Proyecto Prakash para asociar la visión con otros sentidos, tuvimos la oportunidad de abordar la pregunta de Molyneux. Trabajamos con niños que acababan de ser operados y que hicimos participar en experimentos de «emparejamiento con la muestra». El niño veía o tocaba un objeto sencillo sobre un espacio uniforme (la muestra) y después debía elegirlo entre un par de objetos diferentes presentados visualmente o a través del tacto.



CAMPAÑAS DE SELECCIÓN: **A través de sesiones de divulgación en colegios y pueblos se buscan niños que puedan beneficiarse de la cirugía ocular.**



PREPARACIÓN: **Un niño se somete a un examen oftalmológico para determinar su idoneidad para el tratamiento.**

El caso de YS, un niño de ocho años que padecía unas densas cataratas congénitas en ambos ojos, sirve como ejemplo ilustrativo. Igual que la mayoría de los niños del proyecto, YS se sentía bien dos días después de la cirugía y estaba preparado para trabajar con el equipo de investigación.

En la prueba, una tela evitaba que YS pudiera ver sus manos. Se le entregaba un objeto (la muestra) para que lo tocara y luego lo devolviera. Entonces se le daba la muestra y otro objeto y se le pedía que retornara la primera. El niño la identificaba sin dificultad en cualquiera de las parejas que se le presentaran. En el campo puramente visual sus resultados eran igualmente perfectos. Sin embargo, en la tarea crucial de transferencia, esto es, el reconocimiento visual de lo que había sentido en sus manos, la calidad de sus respuestas caía en picado. Otros cuatro niños con los que trabajamos exhibían el mismo comportamiento.

Tales descubrimientos nos llevan a pensar que la respuesta a la pregunta de Molyneux es negativa: no hay una transferencia de la percepción táctil a la visual justo después de comenzar a ver. Por muy relevante que este resultado pueda parecer, hay quizás un epílogo aún más fascinante.

Cuando examinamos a YS una semana más tarde, nos quedamos estupefactos al descubrir que su destreza para resolver la tarea de transferencia había mejorado notablemente: había pasado de elegir los objetos al azar a alcanzar un nivel casi perfecto. Otros dos niños mostraban mejoras similares. En tan solo unas semanas, los participantes del proyecto comienzan a adquirir la capacidad de identificar visualmente un objeto que antes han percibido con el tacto, lo que indica que existe una habilidad latente para aprender a asociar diferentes sentidos con rapidez. Considerados en conjunto, estos estudios demuestran que, a pesar de varios años de ceguera congénita, no se puede descartar el desarrollo de aptitudes visuales complejas a una edad relativamente avanzada. Este hallazgo representa una buena noticia tanto desde una perspectiva científica como clínica. Sugiere que la plasticidad neuronal (capacidad del sistema visual, por ejemplo, para adaptarse a nuevas experiencias) existe incluso en los últimos años de la infancia o en jóvenes adultos y que, según se desprende de nuestros experimentos, los niños se beneficiarían de la cirugía.

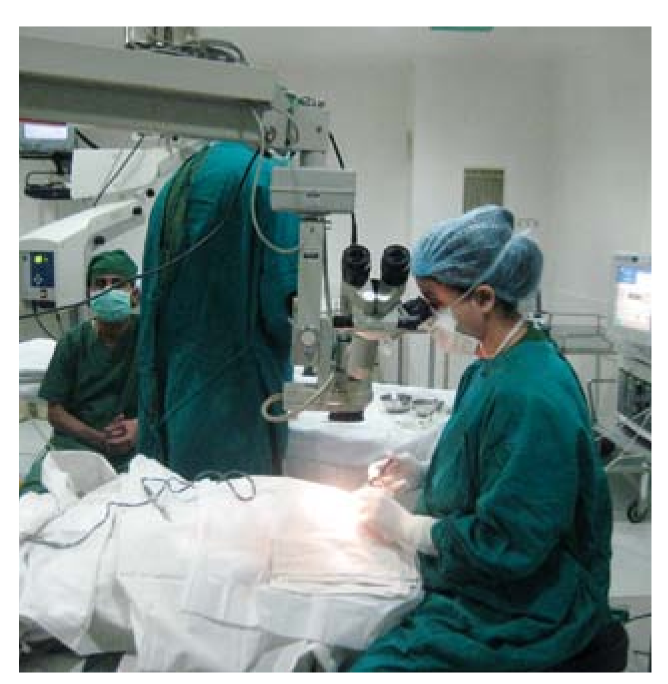
Este conocimiento sentó las bases para continuar con un minucioso programa de investigación del desarrollo visual al final de la infancia. En niños del Proyecto Prakash de edades que van desde los seis años hasta más de veinte, hemos evaluado un amplio abanico de funciones visuales. Hemos comprobado así que la privación prolongada afecta a algunos aspectos fundamentales de la visión, tales como la agudeza (nivel de resolución de un patrón visual), el contraste espacial (cambios en la agudeza ante variaciones de contraste en la imagen) y la estabilidad óptica. Estas deficiencias parecen ser permanentes, dado que ni siquiera un año más tarde las medidas alcanzan los niveles normales.

Pero cuando más allá de estos parámetros básicos exploramos las llamadas funciones visuales superiores, hallamos pruebas relevantes sobre la adquisición de ciertas destrezas (en particular, la de distinguir objetos de una imagen y relacionar la información visual con otros sentidos). Los niños mostraban también mejorías en su capacidad para identificar caras y razonar sobre el orden espacial de los objetos que observaban.

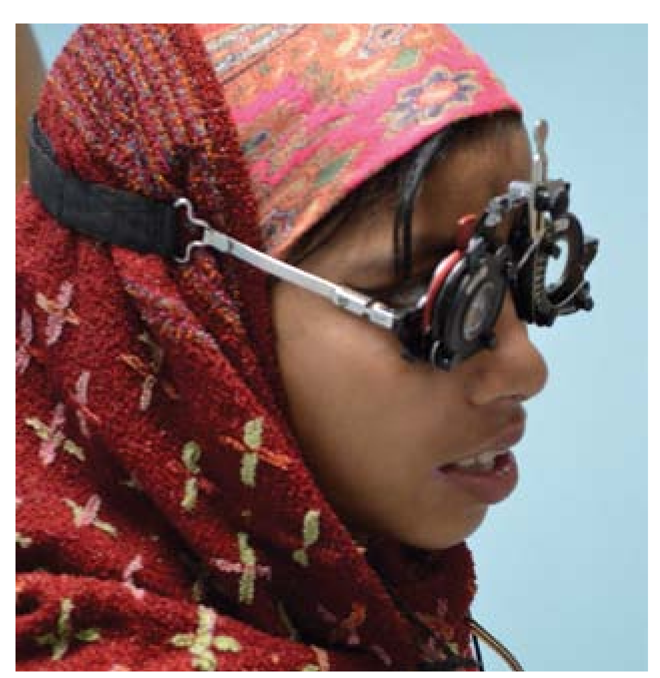
EL NUEVO PANORAMA

Los resultados están comenzando a darnos una idea de los posibles logros y fracasos cuando un niño adquiere la visión a una edad tardía. Por una parte, las funciones visuales no desaparecen de modo irreparable si los ojos y las regiones cerebrales responsables del procesamiento visual no están sometidas a un uso intenso durante el «período crítico», que se piensa coincide con los primeros años de la infancia. Por otra parte, resulta innegable la importancia de la experiencia visual temprana para el desarrollo normal de capacidades tales como la visión de alta resolución.

CORTESÍA DE PROJECT PRAKASH



EN EL QUIRÓFANO: Un médico extirpa cuidadosamente las cataratas, lo que permite al niño ver claramente por primera vez en su vida.



ADAPTACIONES PARA VER: Una niña se somete a un examen postoperatorio con el optometrista para que le prescriba unas gafas.

Los datos preliminares constituyen una base sólida para poner en marcha una serie nuevas investigaciones, algunas de las cuales tal vez se alejen del tema de la ceguera. En concreto, estamos desarrollando un programa informático que reconoce automáticamente categorías de objetos visuales en vídeos (por ejemplo, caras). Además, los tipos de deficiencias en la integración de la información visual que muestran los niños que acaban de recuperar la visión presentan semejanzas con las observadas en niños con autismo. El intento de relacionar ambos problemas ha derivado en una serie de estudios en mi laboratorio con el objetivo de averiguar las causas de los trastornos de procesamiento sensorial en el autismo.

El trabajo que tenemos por delante promete ser aún más excitante que el anterior. Nos preguntamos acerca de la relación entre la estructura del cerebro y sus funciones. Tenemos en mente usar imágenes de resonancia magnética funcional para observar los cambios en la corteza cerebral de niños que comienzan a ver. Comparando el efecto del tratamiento realizado a diferentes edades podremos averiguar hasta cuándo puede reorganizarse el cerebro. Tal vez logremos determinar también los casos en los que la cirugía tiene lugar demasiado tarde, si otros sentidos (como el tacto o el oído) ya han ocupado las áreas cerebrales que normalmente se emplean para el procesamiento visual.

El Proyecto Prakash se enfrenta a grandes retos, entre ellos, ampliar los programas de difusión y tratamiento y facilitar la integración de los niños en la sociedad. Nuestros planes para abordar tales objetivos son ambiciosos; proponemos comenzar con la construcción de un Centro Prakash para Niños (donde se integren los tratamientos médicos, la educación y la investigación). Estará dotado de un hospital pediátrico, un centro puntero de investigación en neurociencia y una unidad de rehabilitación para los recién tratados.

Los esfuerzos de difusión del proyecto han permitido realizar reconocimientos oftalmológicos a unos 40.000 niños de algunos de los pueblos más pobres y olvidados del norte de la India. Cerca de 450 menores con discapacidad visual han sido operados y han recibido seguimiento médico, y más de 1400 han obtenido tratamientos farmacológicos y ópticos. Sin embargo, dada la magnitud del problema, se trata solo de un comienzo.

Los miembros del equipo nos sentimos satisfechos por los resultados que ha proporcionado el Proyecto Prakash, pero el trabajo también nos ha afectado a un nivel más profundo, más personal. Cada niño ciego con el que hemos trabajado poseía una historia única de dificultades y aislamiento social. De igual modo, cada uno experimentó un cambio singular en su vida tras el tratamiento. SK regresó a su estado natal con esperanzas renovadas para cumplir su deseo: ser maestro en una escuela. JA, tratado a los catorce años, puede ahora, seis años más tarde, conducir por su cuenta en el caótico tráfico de Nueva Delhi.

La madre de tres hijos nacidos con cataratas y operados el año pasado ya no recibe las burlas de sus vecinos por considerarla portadora de una maldición. Dos hermanos que han comenzado a ver hace tan solo unos meses tras padecer durante ocho años ceguera congénita están entusiasmados con la idea de cambiarse a un colegio para niños que ven.

Tales transformaciones sirven como testimonio del poder de la colaboración: la deuda del Proyecto Prakash es con los científicos, médicos, educadores y mecenas que se unieron para hacer avanzar tanto la ciencia clínica como la básica. Y personalmente, por supuesto, estoy enormemente en deuda con el cuenco azul de cristal y aquella persona tan especial que fue su dueña.

PARA SABER MÁS

Conferencia TED de Pawan Sinha sobre cómo aprende a ver el cerebro, noviembre de 2009. **www.ted.com/talks/pawan_sinha_on_how_brains_learn_to_see.html**

Mecanismos neuronales de la percepción visual. Javier Cudeiro en *Mente y cerebro*, marzo/abril de 2010.

The newly sighted fail to match seen with felt. Richard Held et al. en *Nature Neuroscience*, vol. 14, n.º 5, págs. 551-553, mayo de 2011.

Sitio web del Proyecto Prakash: **www.projectprakash.org**



MINAS DE PETRÓLEO: La región de arenas bituminosas de Alberta es uno de los pocos lugares del planeta donde el petróleo puede extraerse a cielo abierto.

Calentamiento viscoso

El futuro de las minas de arenas bituminosas de Alberta —y el del clima— podría depender de la construcción de un oleoducto

David Biello

Las luces rojas parpadean, pero Ben Johnson no les presta atención. El ingeniero, alto, delgado y curtido, descansa apoyado contra un mostrador repleto de ordenadores. Mientras, describe cómo transcurre la vida en una de las minas de arenas bituminosas de Alberta, en Canadá. Su tarea consiste en extraer un lodo de mena y agua y «liberar el betún», una sustancia similar al alquitrán que puede refinarse hasta obtener crudo tradicional. Junto con otros dos compañeros, se ocupa de la estación de vigilancia, situada cerca de la base de una estructura con forma de cono y del tamaño de un edificio de tres plantas. Por el centro del embudo invertido fluyen barro y agua calientes. El betún, o bitumen, asciende hasta alcanzar la parte superior y se derrama por las rejillas circundantes.

En un percance ocurrido el año pasado, el betún borboteó tan rápido que cayó en cascada por los laterales del embudo e inundó el edificio hasta la altura de una pantorrilla. Para prevenir que algo así suceda de nuevo, se han instalado sensores que controlan la temperatura, la presión y otros parámetros. En caso de que se detecte algún problema, salta la alarma. Pero eso sucede tantas veces («mil alarmas al día», según Johnson) que los ingenieros han desconectado el sonido. «No podemos dejar que suene ese *bing-bing-bing* porque nos volvería locos», comenta.

Johnson dirige una de las numerosas células separadoras de la mina de North Steepbank, regentada por la compañía canadiense Suncor Energy. La explotación solo supone una pequeña fracción de la producción de arenas bituminosas en Alberta, las cuales se extienden a lo largo de una superficie de más de 150.000 kilómetros cuadrados. Dado el elevado precio que ha alcanzado el petróleo en la última década, las minas han sido rentables y Canadá ha aumentado la producción. En 2012, la exportación de petróleo procedente de la región superó los 55.000 millones de dólares, la mayoría con destino a Estados Unidos. Así las cosas, se entiende que el equipo de Johnson no se pare cada vez que salta la alarma.

Pero las prisas por explotar las arenas bituminosas de Alberta sí disparan otra clase de alarmas: las de los climatólogos. Las emisiones de dióxido de carbono derivadas de la quema de combustibles fósiles están empujando al planeta hacia un umbral crítico en la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero: 450 partes por millón, límite que se asocia a un calentamiento de dos grados Celsius. Por encima de dicha cota, los científicos temen que las consecuencias climáticas resulten catastróficas. El carbón constituye una fuente de carbono fósil aún mayor que las arenas bituminosas, pero la extracción y el refinado de estas últimas requieren más energía que la producción de petróleo tradicional, por lo que suponen una emisión extra de gases de efecto invernadero. Además, las explotaciones de arenas bituminosas están creciendo mucho más deprisa que la mayoría de las demás fuentes de petróleo. En este contexto, la liberación del carbono atrapado en las arenas bituminosas podría truncar toda esperanza de limitar el calentamiento global a dos grados Celsius.

Hoy por hoy, el futuro de las arenas bituminosas de Alberta —y, con ellas, el del clima— parece depender de un oleoducto actualmente en proyecto: el Keystone XL. Este conducto, que se extendería desde Alberta hasta las refinerías de Texas, se convertiría en la principal vía para transportar el crudo extraído de las arenas. Durante más de una década, los defensores de la explotación en Alberta han argumentado que sus arenas bituminosas constituyen una fuente esencial de petróleo para EE.UU., y que su explotación evitará conflictos en Oriente Próximo y otras regiones. Para aprovechar ese potencial, solo haría falta hallar la manera de transportar el petróleo de Canadá a EE.UU. u otros destinos más lejanos, como Europa y Asia. De no construirse un oleoducto como el Keystone XL, podrían emplearse otros oleoductos o ferrocarriles. Sin embargo, algunos expertos independientes han advertido de que el Keystone XL podría resultar clave para que las exportaciones de Alberta puedan seguir creciendo.

Ninguna de esas disquisiciones salió a la luz cuando, durante su campaña de reelección, Barack Obama aplazó la decisión sobre el Keystone XL. Pero, cuando se retome el asunto, su resolución deberá hacer frente a un cúmulo mucho mayor de circunstancias.

LA BILLONÉSIMA TONELADA

En medio del gélido invierno de Alberta y ante la panorámica que ofrece la mina de Suncor, uno se siente tentado a pensar que un ligero calentamiento planetario tal vez no vendría mal. La mina se encuentra en una extensión industrial situada entre

GARTH LENZ

bosques boreales, unos 30 kilómetros al norte de la próspera ciudad de Fort McMurray, donde los alquileres alcanzan los precios de Manhattan y los camioneros ganan 100.000 dólares al año. A lo largo de un camino de grava puede contemplarse un desfile de Caterpillar 797F, el mayor camión del mundo. Cada uno transporta 400 toneladas de arenas bituminosas. (Las mujeres conductoras están muy bien valoradas porque no abusan del equipamiento; sin embargo, son difíciles de encontrar, ya que en la ciudad el número de hombres triplica al de mujeres.) Los camiones realizan continuos viajes desde las descomunales excavadoras hasta la planta separadora en la que trabaja Johnson. El recorrido completo dura unos 40 minutos.

Los grandes vehículos descargan la mena en un triturador industrial del tamaño de un automóvil. De ahí pasa a una enorme cinta transportadora que llevará las arenas hasta la célula de separación de Johnson. Una vez descargada del camión, bastan unos 30 minutos para convertir un bloque de mena en betún liberado. Negro y viscoso, este se derrama como la espuma por la parte superior del separador y, a continuación, se recolecta y fluye por un conducto que comunica con una diminuta refinería. Allí se calienta a altas temperaturas, lo que retira el carbono y genera un hidrocarburo similar al petróleo crudo. Otra posibilidad consiste en combinar el betún con hidrocarburos más ligeros en enormes tanques achatados; la mezcla final, apodada *dilbit* (betún diluido), resulta lo bastante líquida para fluir grandes distancias por un oleoducto hasta las refinerías de Estados Unidos. Eso es lo que persigue el proyecto Kingston XL.

North Steepbank no representa más que una pequeña fracción de la mayor mina de arenas bituminosas del mundo. La producción total de arenas bituminosas en Alberta asciende a casi dos millones de barriles diarios, en torno a la décima parte del consumo estadounidense. Las minas, con sus extensos lagos de aguas tóxicas residuales y sus bloques de azufre amarillo y brillante, han alcanzado tales proporciones que pueden verse desde el espacio; una mancha industrial que se expande poco a poco por el bosque boreal.

A pesar de sus dimensiones, las peores consecuencias ambientales de las minas podrían ser las que no se ven. Evitar el umbral de dos grados Celsius de calentamiento implica que la humanidad debe atenerse a lo que algunos expertos han denominado el «presupuesto de carbono»: un billón de toneladas métricas de emisiones de carbono acumuladas.

La idea de presupuesto de carbono se debe al físico de la Universidad de Oxford Myles Allen y a otros seis científicos. En 2009, recopilaron datos sobre el aumento de las temperaturas y los introdujeron en modelos computacionales sobre el cambio climático futuro. Entre otras características, estos modelos tienen en cuenta el hecho de que el CO_2 persiste en la atmósfera y retiene el calor durante siglos. La cantidad de un billón de toneladas engloba todo el carbono que las actividades humanas pueden permitirse generar hasta 2050 si se desea evitar el umbral de dos grados de calentamiento. No importa la rapidez con la que se alcance ese límite. El aspecto esencial consiste en no excederlo. «Lo fundamental son las toneladas de carbono; la velocidad a la que se quemen no cambia gran cosa», corrobora James E. Hansen, climatólogo de la NASA ya retirado que ha estudiado el cambio climático desde 1988. Hace poco, Hansen fue arrestado durante una protesta contra el oleoducto Keystone XL.

La procedencia del carbono tampoco influye. El planeta solo puede quemar una determinada cantidad de combustibles de carbono, ya se trate de arenas bituminosas, carbón, gas natural, madera o cualquier otra fuente de gases de efecto invernadero. «Desde el punto de vista del sistema climático, una molécula de CO_2 es una molécula de CO_2. No importa si procede de carbón o de gas natural», apunta Ken Caldeira, experto en modelizaciones climáticas del departamento de ecología global del Instituto Carnegie, en Stanford.

Hasta hoy, la quema de combustibles fósiles, la deforestación y otras actividades han inyectado 570.000 millones de toneladas de carbono en la atmósfera. Según Allen, solo desde el año 2000 se han emitido más de 250.000 millones de toneladas de CO_2. En la actualidad, las actividades humanas emiten cada año unos 35.000 millones de toneladas de CO_2 (lo que equivale a 9500 millones de toneladas de carbono), una cifra que crece al mismo ritmo que la economía mundial. A partir de esos datos, Allen calcula que el billón de toneladas de carbono se alcanzará en verano de 2041. Por otro lado, permanecer dentro de los límites requeriría reducir las emisiones en un 2,5 por ciento anual a partir de hoy.

TESORO SUBTERRÁNEO

Las arenas bituminosas de Alberta contienen enormes cantidades de carbono. Este procede de las algas y otros seres microscópicos que vivieron hace cientos de millones de años en un cálido mar interior y que, como producto de la fotosíntesis, succionaron el carbono de la atmósfera. Haciendo uso de la tecnología actual, podrían extraerse hasta 170.000 millones de barriles de petróleo de las arenas de Alberta. En caso de quemarlos, incorporarían unos 25.000 millones de toneladas de carbono a la atmósfera. Y si los ingenieros diesen con un método para separar de la arena hasta el último resto de betún, aguardarían en el subsuelo de la región otros 1,63 billones de barriles de petróleo adicionales, los cuales inyectarían otros 250.000 millones de toneladas de carbono en la atmósfera. Según señala el ingeniero John P. Abraham, de la Universidad de St. Thomas-Minnesota: «Si quemáramos todo el petróleo procedente de las arenas bituminosas, el aumento de temperatura asociado solo a ellas alcanzaría la mitad del valor que ya se ha medido»; es decir, unos 0,4 grados Celisus.

La explotación a cielo abierto alcanza yacimientos enterrados a 80 metros de profundidad. Pero estos solo representan el 20 por ciento del volumen total de arenas bituminosas. En otros lugares, las arenas se encuentran a centenares de metros bajo tierra, por lo que las compañías energéticas han desarrollado un método, conocido como producción in situ, para licuar el betún allí donde está enterrado.

En 2012, Cenovus Energy licuó más de 64.000 barriles diarios de betún subterráneo en Christina Lake, unas instalaciones de Alberta que deben su nombre a un lago cercano. La operación

EN SÍNTESIS

Para evitar un calentamiento global de más de dos grados Celsius, de consecuencias potencialmente catastróficas, las emisiones acumuladas de carbono no deberían superar el billón de toneladas.

La atmósfera terrestre ya ha sobrepasado más de la mitad del camino hacia dicho límite. Un aumento en la explotación de arenas bituminosas aceleraría las emisiones de manera considerable.

En caso de construirse el oleoducto Keystone XL, de 2700 kilómetros, la demanda dispararía la industria de arenas bituminosas en Canadá, lo cual empujaría al planeta hacia su límite de emisiones.

constituye uno de los frentes que encabezan el reciente auge de las arenas bituminosas. Las nueve calderas industriales emplazadas sobre el yacimiento queman gas natural para calentar agua y transformarla en vapor a 350 grados Celsius. Desde una sala de control más amplia que la de Suncor, los trabajadores de Cenovus inyectan ese vapor hacia las profundidades, con lo que consiguen licuar el betún. Por último, este se bombea hasta la superficie a través de un pozo y se transporta en un conducto para continuar su procesado. Greg Fagnan, director de operaciones de Christina Lake, compara el complejo con una planta gigante de tratamiento de aguas que, además, produce petróleo. De vez en cuando tiene lugar una explosión que eyecta al aire el vapor de agua junto con arenas parcialmente fundidas. Así sucedió en el verano de 2012, cuando Devon Energy se excedió y aplicó demasiada presión.

Los ingenieros de Christina Lake inyectan unos dos barriles de vapor para extraer uno de betún. Todo ese vapor —y el gas natural quemado para calentarlo— hace que la fusión de betún derive en una contaminación por gases de efecto invernadero dos veces y media mayor que la explotación a cielo abierto (la cual ya constituye por sí sola una de las formas de producción de petróleo que más emisiones genera). Según la Asociación Canadiense de Productores de Petróleo, el aumento de la producción basada en este método ha causado que las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de las arenas de Alberta hayan aumentado en un 16 por ciento desde 2009. En 2012, la producción derivada de la minería subterránea de las arenas de Alberta igualó, por primera vez, a la de las explotaciones a cielo abierto. Gracias a métodos como los empleados en Christina Lake, la fusión de betún pronto se convertirá en la primera forma de producción.

Sin embargo, la producción in situ se utiliza únicamente para extraer el betún que se encuentra por debajo de 200 metros. En consecuencia, existe un tramo de unos 120 metros que resulta demasiado profundo para la explotación a cielo abierto y demasiado superficial para la producción in situ. Hasta ahora, los ingenieros no han hallado un método que permita explotar dicho tramo, por lo que, hoy por hoy, la quema de todo el combustible contenido en los depósitos de arenas bituminosas se antoja improbable.

Con todo, la combustión de un volumen significativo de esas arenas supondría un paso muy notable hacia el límite que impone el presupuesto global de carbono. La única forma de hacerlo sin rebasar dicha cota consistiría en detener la quema de carbón u otros combustibles fósiles, o hallar un método para reducir de manera drástica las emisiones de gases de efecto invernadero de las arenas bituminosas. Ninguno de los dos proyectos parece probable. «Las emisiones [procedentes de las arenas bituminosas] se han duplicado desde 1990 y se duplicarán de nuevo en 2020», asegura Jennifer Grant, directora de la investigación sobre arenas petrolíferas que lleva a cabo el Instituto Pembina, un grupo medioambiental canadiense.

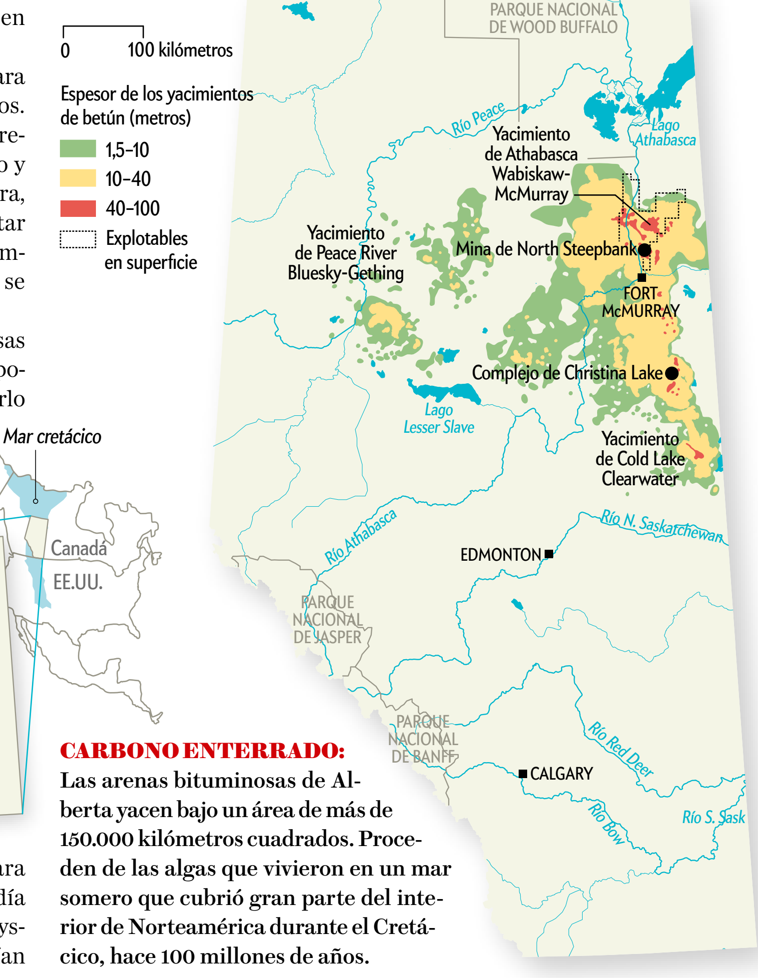
CONEXIÓN KEYSTONE

El presupuesto de carbono explica que Abraham, Caldeira y Hansen se unieran a otros quince científicos para firmar una carta dirigida a Barack Obama. En ella se le pedía que rechazara el proyecto de construcción del oleoducto Keystone XL, de 2700 kilómetros de longitud. Los expertos sostenían que dar luz verde al oleoducto —y, en consecuencia, estimular una mayor producción de combustible procedente de arenas bituminosas— sería algo «contrario a los intereses nacionales y planetarios».

Obama había aplazado la aprobación del oleoducto justo antes de las elecciones presidenciales de 2012. Tanto en su segundo alegato inaugural como en su discurso sobre el estado de la Unión de 2013, Obama lanzó un mensaje benévolo para el medioambiente: la decisión sobre el Keystone XL se tomaría después de que el Departamento de Estado emitiese su informe final.

En una primera versión de dicho informe, el Departamento de Estado había restado importancia al oleoducto, tanto en lo que se refería a su impacto sobre el medio ambiente como en sus posibles efectos sobre la extracción de arenas bituminosas. Según argumentaban, era poco probable que la construcción del Keystone XL acarrease «consecuencias sustanciales» para las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, los autores del informe parecían haber asumido que, en caso de que el Keystone XL no se construyera, Canadá encontraría otras vías para hacer llegar el petróleo hasta los consumidores.

En abril, la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA) publicó una respuesta que proporcionaba otra visión sobre el asunto. Según Cynthia Giles, de la Oficina de Garantías de Aplicación y Cumplimiento de la EPA, el informe del Departamento de Estado se basaba en un planteamiento económico defectuoso. Ateniéndose a experiencias anteriores en materia de grandes evaluaciones ambientales, la EPA indicaba que las alternativas



CARBONO ENTERRADO: Las arenas bituminosas de Alberta yacen bajo un área de más de 150.000 kilómetros cuadrados. Proceden de las algas que vivieron en un mar somero que cubrió gran parte del interior de Norteamérica durante el Cretácico, hace 100 millones de años.

FUENTE: SERVICIO DE INSPECCIÓN GEOLÓGICA DE ALBERTA Y COMITÉ DE CONSERVACIÓN DE RECURSOS ENERGÉTICOS; MICHAEL NEWHOUSE (*mapa*)

FORMAS DE EXPLOTACIÓN

Petróleo a partir de arena

Por efecto del calor terrestre, las arenas oleaginosas de Alberta han formado un petróleo viscoso similar al alquitrán denominado betún, o bitumen. Este reviste la arena y el agua, por lo que estos materiales deben extraerse para poder procesar el betún. Una mena típica puede contener un 73 % de arena, 12 % de betún, 10 % de arcilla y 5 % de agua. La separación de los elementos viscosos genera verdaderos lagos de residuos tóxicos.

a Keystone XL supondrían, por un lado, unos costes más elevados y, por otro, se enfrentarían a una oposición mayor. Dicho de otro modo, prescindir del Keystone XL sí limitaría la explotación de las arenas bituminosas. En mayo, la Agencia Internacional de la Energía (IEA) corroboró ese análisis en una evaluación propia.

En la actualidad el petróleo procedente de las arenas bituminosas se transporta en tren, pero se trata de un recurso temporal. Con los precios actuales, el traslado en ferrocarril resulta tres veces más caro que en un oleoducto. Un aumento en la explotación de arenas bituminosas elevaría los gastos del transporte ferroviario hasta niveles prohibitivos, lo que implicaría un obstáculo para su futuro desarrollo.

¿Podrían construirse otros conductos en caso de que el Keystone XL no saliera adelante? Canadá cuenta con la opción de transportar el crudo hacia la costa del Pacífico para embarcarlo en superpetroleros con destino a China. También podría dirigirse hacia el este, a través de conductos ya existentes, para enlazar con la región central de Estados Unidos o la costa atlántica. Pero todas esas opciones acarrean sus propios problemas. Un conducto hacia el Pacífico (la opción menos viable) debería cruzar las montañas Rocosas a través de terrenos pertenecientes a las naciones originarias de Canadá y otros grupos indígenas de la Columbia Británica, quienes se han mostrado contrarios al oleoducto por temor a posibles derrames y otros problemas. Un conducto hacia el Atlántico podría aprovechar las canalizaciones que ya conectan Alberta con la costa este norteamericana. En tal caso, los ingenieros deberían invertir el flujo del petróleo, como ya hizo ExxonMobil con el oleoducto Pegasus, que hoy transporta crudo desde Illinois hasta Texas. Pero, una vez invertidos, los conductos antiguos muestran una mayor propensión a las fugas. Sin ir más lejos, el pasado mes de abril se produjo un escape en el conducto Pegasus a su paso por Arkansas. Además, modernizar los oleoductos existentes probablemente desatase protestas por parte de los ambientalistas y otros colectivos.

A la vista de tales escollos, los informes de la EPA y la IEA concluyen que la industria de arenas bituminosas necesita el oleoducto Keystone XL para continuar expandiéndose. Las arenas bituminosas de Alberta producen en la actualidad 1,8 millones de barriles de petróleo al día. El Keystone XL transportaría 830.000 barriles diarios.

Consciente de la oposición de los ambientalistas, Alberta y las compañías energéticas han tratado de minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero en las explotaciones de arenas bituminosas. A tal fin, Royal Dutch Shell está probando una

costosa alternativa para transformar el betún en petróleo mediante la adición de hidrógeno, en lugar de calentar el carbono para generar coque de petróleo. La multinacional petrolífera también ha comenzado a desarrollar planes para añadir a una de sus pequeñas refinerías equipamiento técnico de captura y almacenamiento de carbono; un proyecto bautizado Quest. Una vez completado, en 2015, Quest tratará de enterrar un millón de toneladas de CO_2 al año, en torno a un tercio de lo que emiten sus instalaciones. Otro proyecto similar pretende capturar CO_2 y utilizarlo para extraer petróleo del subsuelo.

Alberta es también una de las pocas zonas del mundo productoras de petróleo en las que existe un impuesto sobre el carbono. En la actualidad se sitúa en 15 dólares por tonelada, pero se continúa hablando de un posible aumento. La región ha invertido los más de 300 millones de dólares recaudados hasta ahora en desarrollo tecnológico, principalmente para reducir las emisiones de CO_2 procedentes de las arenas bituminosas. «[Los impuestos] nos conceden al menos algo de munición cuando la gente nos ataca por nuestra huella de carbono», señalaba en 2011 Ron Liepert, por entonces ministro de energía.

Los esfuerzos para reducir la huella de carbono de las arenas bituminosas elevan todavía más los costes de extracción del petróleo, si bien no han repercutido de manera significativa en las emisiones. Según la Asociación Canadiense de Productores de Petróleo, los 1,8 millones de barriles diarios producidos en 2011 a partir de arenas bituminosas supusieron aquel año más de 47 millones de toneladas de gases de efecto invernadero.

En un análisis de 2010 sobre las posibilidades de permanecer por debajo de los dos grados de calentamiento, la IEA manifestó que la producción de las arenas bituminosas de Alberta no podría exceder los 3,3 millones de barriles diarios en 2035. Sin embargo, las explotaciones ya aprobadas o en vías de desarrollo podrían implicar que, hacia 2030, la producción aumentase hasta los 5 millones de barriles diarios. Resulta difícil reconciliar la explotación de las arenas bituminosas con un ajuste al presupuesto de carbono.

ROMPER EL PRESUPUESTO DE CARBONO

¿Es injusto estigmatizar las arenas bituminosas? Al fin y al cabo, existen otras formas de combustibles fósiles que implican más emisiones pero que no desatan tanta ira. Quizá deberían. En 2011, las centrales eléctricas de carbón estadounidenses emitieron casi 2000 millones de toneladas de gases de efecto invernadero, unas ocho veces la cantidad producida por la minería, refinado y combustión de las arenas bituminosas. En todo el planeta, numerosas minas de carbón dejan una mella igual de visible en el paisaje y suponen una mayor contribución al cambio climático. Sin embargo, minas como las de la cuenca del río Powder, entre Montana y Wyoming, no conforman el punto de mira de protestas como aquellas a las que se enfrenta el Keystone XL. El Servicio de Inspección Geológica de EE.UU. señala que la cuenca del Powder alberga 150.000 millones de toneladas de carbón extraíbles con la tecnología actual. Quemar esa cantidad de combustible implicaría superar con creces el límite del billón de toneladas de carbono. Sin embargo, los activistas no se atan a las vías para bloquear el paso de los kilométricos trenes que transportan el carbón.

El proyecto australiano de expandir las exportaciones de carbón a Asia podría derivar en una emisión de 1200 millones de toneladas de CO_2 al año. Tal cantidad eclipsaría la derivada de la mayor explotación posible de las arenas bituminosas. Estados Unidos y países como Indonesia también están considerando una expansión de la industria del carbón. El cierre o la limitación de la industria carbonífera en EE.UU. compensaría con creces cualquier futura ampliación de la explotación de arenas como consecuencia del Keystone XL, si bien dichos combustibles fósiles se utilizan con finalidades distintas: el carbón para electricidad y el petróleo para transporte.

Canadá, además, representa una diana fácil, dado que se trata de una democracia amistosa y susceptible de ceder a la presión ambientalista. Otros productores de «petróleo pesado» (tan contaminante como el betún de las arenas bituminosas), como México, Nigeria o Venezuela, no se ven sometidos a tantos exámenes a pesar de sus altas tasas de emisiones de CO_2. De hecho, extraer el petróleo pesado de un viejo yacimiento de California constituye la peor fuente individual de emisiones de CO_2 de todas las labores de extracción petrolífera del mundo, incluida la fusión de arenas bituminosas. «Si piensan que recurrir a otras opciones de petróleo [distintas a las arenas bituminosas] es mucho más conveniente, se equivocan», asegura el ingeniero químico Murray Gray, director científico del Centro para la Innovación de Arenas Petrolíferas de la Universidad de Alberta. «Un aumento global del consumo de carbón da mucho más que pensar.»

Con todo, en ninguna parte se ha disparado la explotación de esas otras fuentes de petróleo al ritmo al que lo ha hecho la extracción de arenas bituminosas en Alberta, cuya producción en la pasada década creció en más de un millón de barriles diarios. Para no rebasar los límites del presupuesto de carbono, el mundo no debería extraer más de la mitad de las fuentes de petróleo, gas y carbono conocidas y económicamente viables. Dicha restricción implica que gran parte de los combustibles fósiles (en particular, las formas más sucias de petróleo, como el procedente de las arenas bituminosas) debería permanecer enterrada.

Algunas razones de carácter económico podrían beneficiar al medioambiente global. Gracias a la extracción de petróleo por fracturación hidráulica de las pizarras de Bakken, en Dakota del Norte, ha disminuido la demanda del petróleo canadiense. Eso ha provocado el abandono de nuevos proyectos de explotación en las arenas de Alberta, como el de la pequeña refinería Voyageur, valorada en 12.000 millones de dólares. Las nuevas normativas sobre eficiencia del combustible en los vehículos estadounidenses reducirán asimismo la demanda, al menos a corto plazo. A pesar de todo, las arenas bituminosas continuarán enterradas, lo que siempre las convertirá en un objetivo tentador una vez se agote el petróleo más sencillo de extraer.

Tanto si se aprueba la construcción del oleoducto Keystone XL como si se habilitan otras vías para transportar el petróleo de las arenas de Alberta hasta China, las exportaciones continuarán aumentando y acelerarán la acumulación de CO_2 en la atmósfera. En lugar de reducir las emisiones en un 2,5 por ciento cada año (el objetivo que Allen estimaba necesario para mantener el planeta alejado del umbral de los dos grados Celsius), las emisiones de gases de efecto invernadero continuarán aumentando. En ese contexto, cada fracción de carbono procedente de combustibles fósiles —arenas bituminosas o cualquier otro— cuenta.

PARA SABER MÁS

Minería del petróleo. Richard L. George en *Investigación y Ciencia*, n.º 260, mayo de 1998.

Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. Myles R. Allen et al. en *Nature*, vol. 458, págs. 1163-1166, 30 de abril de 2009.

The Alberta oil sands and climate. Neil C. Swart y Andrew J. Weaver en *Nature Climate Change*, vol. 2, págs. 134-136, 19 de febrero de 2012.

The facts on oil sands. Asociación Canadiense de Productores de Petróleo, 2013. Disponible en **www.capp.ca/getdoc.aspx?DocId=220513&DT=NTV**



ETOLOGÍA

El duelo en los animales

Cada vez más datos obtenidos en especies tan diversas como gatos o delfines apuntan a que el pesar por la muerte de un ser cercano no es una singularidad de los humanos

Barbara J. King

Desde la cubierta de un buque de investigación en aguas del golfo de Arta, en Grecia, Joan Gonzalvo avistó una hembra de delfín mular en una situación angustiosa. Con la ayuda del hocico y las aletas pectorales empujaba contra la corriente a una cría recién nacida, seguramente suya, con la pretensión de alejarla del barco. Parecía como si quisiera animarla a moverse, aunque sin ningún fin aparente: la cría estaba muerta. Bajo el sol radiante de aquel día cálido, el cuerpo a flote había comenzado a descomponerse con rapidez y la madre arrancaba jirones de piel y carne del cadáver.

Gonzalvo y sus compañeros comenzaron a inquietarse al día siguiente cuando comprobaron que la hembra seguía empeñada en su inútil esfuerzo: zarandeaba obsesivamente a la cría y había renunciado a alimentarse con normalidad, lo que ponía en peligro su salud dado el metabolismo acelerado de estos cetáceos. Tres delfines de la población de la zona, compuesta por 150 individuos, se acercaron; pero ninguno interrumpió ni secundó su actitud.

Gonzalvo, biólogo marino del Instituto de Investigación Tethys en Milán, decidió no recuperar el cadáver para practicarle la autopsia, como solía hacer con fines científicos. A principios de este año, me confesaba: «Lo que hizo mantenerme al margen fue el respeto. Teníamos el privilegio de presenciar una manifestación del vínculo entre madre e hijo en los delfines mulares, una especie que he estudiado durante más de una década. Me interesaba más observar ese comportamiento que interrumpir bruscamente y molestar a la madre en ese momento de dolor.



Barbara J. King es catedrática de antropología en el Colegio William and Mary, de Estados Unidos. Sus estudios sobre simios inferiores y antropomorfos la han impulsado a estudiar los sentimientos y la inteligencia en un gran número de animales.

Si tuviera que describir lo que vi, diría que se trataba de una demostración de duelo».

¿Estaba la delfín realmente apenada por la muerte de su cría? Hace 10 años hubiera dicho que no. Como antropóloga biológica dedicada al estudio de la inteligencia y las emociones de los animales, hubiera reconocido el patetismo de la conducta materna pero me hubiera resistido a interpretarla como una señal de duelo. Al igual que a la mayoría de los etólogos, me enseñaron a describir ese tipo de reacciones con términos neutros como «comportamiento alterado en respuesta a la muerte de otro». Después de todo, es posible que la inmovilidad de la cría pusiera muy nerviosa a la madre. La ortodoxia califica de sensiblero y poco científico atribuir a los animales sentimientos humanos como el duelo.

Pero ahora, en cambio, sobre todo después de dos años de investigación para escribir el libro *How animals grieve*, creo que Gonzalvo tenía razón al pensar que la madre lamentaba la muerte de su retoño. En los últimos años ha aflorado una masa crítica de observaciones en torno a la reacción de los animales ante la muerte que me ha conducido a una conclusión sorprendente: cetáceos, grandes simios, elefantes y muchas otras especies como los animales de granja y de compañía podrían, según las circunstancias y su propia personalidad, lamentar la muerte de un familiar o compañero cercano. Que semejante abanico de especies —algunas bastante alejadas de la humana— llore la pérdida de los seres cercanos sugiere que las raíces de nuestra capacidad para el duelo tienen un origen remoto.

DEFINIR EL DUELO

Desde los tiempos decimonónicos de Charles Darwin, los científicos han debatido acaloradamente sobre si algunos animales expresaban otros sentimientos aparte de los vinculados con los cuidados parentales y otros aspectos básicos como la supervivencia y la reproducción. Darwin pensaba que, dada la conexión evolutiva entre el ser humano y otras especies, debíamos sin duda compartir con ellas numerosos sentimientos. De este modo, consideró que los monos manifestaban duelo y celos, así como placer y disgusto. Pero la designación de tales emociones en los animales fue desterrada poco a poco por el pensamiento científico dominante. A inicios del siglo xx el paradigma conductista se había impuesto, con su insistencia en que solo la conducta observable, y no la vida interior, podía ser estudiada con rigor. Pero gradualmente la comunidad científica ha readmitido la existencia de sentimientos en el mundo animal, en parte gracias a las anécdotas recopiladas durante años en los estudios de campo con mamíferos de cerebro voluminoso. En Tanzania, Jane Goodall narró con un detalle desgarrador la postración y muerte del joven chimpancé Flint semanas después del fallecimiento de su madre, Flo. En Kenia, Cynthia Moss describió cómo los elefantes atendían a sus compañeros moribundos y acariciaban la osamenta de los parientes difuntos. Los biólogos y los antropólogos comenzaron a preguntarse si los animales experimentaban aflicción por la muerte de otros y, de ser así, de qué modo.

Para estudiar y entender el duelo animal se necesita una definición que permita distinguirlo de otros sentimientos. Si bien la de «reacción animal ante la muerte» engloba cualquier conducta exhibida por un individuo tras la pérdida de un compañero, solo se puede tener la sospecha de que existe duelo si se cumplen ciertas condiciones. En primer lugar, dos o más animales deben haber compartido otras actividades distintas a las vinculadas a la mera supervivencia, como la búsqueda de alimento o la procreación. En segundo lugar, cuando uno de ellos muere, el sobreviviente altera sus hábitos normales. Quizá reduce el tiempo que destina a comer o dormir, adopta una postura o una expresión facial indicadora de depresión o inquietud, o sufre un retraso en el crecimiento. Por su parte, Darwin vinculó el duelo con la tristeza. Pero ambos difieren en la intensidad: el animal en duelo sufre mayor congoja y tal vez durante más tiempo.

No obstante, esta definición resulta imperfecta. Por un lado, no disponemos de un parámetro objetivo que permita evaluar con exactitud lo que significa «mayor congoja». ¿Deberían variar los criterios de duelo según la especie? ¿Y podría ese sentimiento adquirir en los animales formas irreconocibles por los humanos? Aún no hay datos para responder a tales preguntas. Es más, no puede decirse que las madres y otros cuidadores que proporcionan alimento o protección a crías que después mueren cumplan el primer criterio (el de relacionarse en otras actividades más allá de las vinculadas a la supervivencia); pese a ello, siguen siendo uno de los principales candidatos a sufrir el duelo del sobreviviente.

Futuros estudios sobre el duelo animal contribuirán a refinar esta definición; por ahora, nos ayuda el análisis crítico de las reacciones de los animales ante el fallecimiento de congéneres cercanos. Por ejemplo, las madres babuino y chimpancé de África a veces acarrean consigo el cadáver de su bebé durante días, semanas o incluso meses, una conducta que a primera vista se asemejaría al duelo. Pero puede suceder que no exhiban ningún indicio externo y relevante de inquietud o dolor. Cuando los animales prosiguen con su rutina habitual, como el apareamiento, su conducta no cumple los criterios del duelo.

ANIMALES DOLIENTES

Con todo, numerosas especies exhiben comportamientos acordes con la susodicha definición de duelo, entre ellas el elefante. Un

EN SÍNTESIS

Tradicionalmente, los etólogos se han resistido a atribuir a los animales sentimientos humanos como el duelo.

Pero un número cada vez mayor de observaciones y testimonios indican que animales tan diversos como los delfines y los patos lamentan la muerte de parientes y compañeros cercanos.

Tal vez el modo en que expresamos el duelo sea exclusivo de nuestra especie, pero las descripciones de este sentimiento en animales delatan su origen evolutivo remoto.



UNA MADRE DELFÍN lleva consigo el cadáver de su cría sobre la aleta dorsal en aguas de Dana Point, California.

CORTESÍA DE SAFARIS DE OBSERVACIÓN DE DELFINES Y BALLENAS CAPITÁN DAVE, DANA POINT, CALIFORNIA, *www.dolphinsafari.com*

ejemplo persuasivo lo ofrece Iain Douglas-Hamilton, de la organización Salvar a los Elefantes, y su equipo del Parque Nacional de Samburu en Kenia, quien en 2003 observó la reacción de un grupo de elefantes ante la agonía de su matriarca, Eleanor. Cuando la vieja elefanta se desplomó, Grace, la matriarca de otra familia, acudió en su ayuda para reincorporarla valiéndose de sus colmillos. Cuando Eleanor volvió a caer, Grace permaneció junto a ella y la empujó durante al menos una hora pese a que su familia se había alejado. Finalmente, Eleanor murió. Durante la semana siguiente, las hembras de cinco familias, entre ellas la suya propia, manifestaron un vivo interés por sus restos. Algunas parecían afectadas y movían el cuerpo con la trompa y las patas o se balanceaban mientras permanecían sobre ella. Basándose en las reacciones de las hembras (ningún macho se acercó al cadáver en todo ese tiempo), Douglas-Hamilton concluyó que los elefantes muestran una respuesta general a la agonía y la muerte y no solo lamentan el fallecimiento de sus allegados, sino también el de los miembros de otras familias.

Los cetáceos también parecen exhibir una respuesta de duelo generalizada. En 2001, Fabian Ritter, de la asociación Mamíferos, Encuentros, Educación, Reconocimiento, observó en las islas Canarias cómo una delfín de dientes rugosos empujaba el cuerpo sin vida de su cría, en una actitud muy similar a la delfín de Arta. No lo hacía sola. A ratos dos adultos nadaban junto a ella y, en otras ocasiones, un grupo de al menos 15 delfines aminoró la marcha para acompañarla. La perseverancia de la madre era conmovedora y, cuando al cabo de cinco días comenzó a flaquear, los dos acompañantes comenzaron a llevar la cría a cuestas.

También las jirafas parecen llorar la pérdida de sus congéneres. En 2010 en la reserva privada de Soysambu Conservancy, en Kenia, una jirafa baringo dio a luz una cría con una extremidad deforme. El animal caminaba menos y permanecía más quieto que las demás crías. Durante las cuatro semanas que vivió, la bióloga Zoe Muller, del Proyecto Jirafa de Rothschild, no vio a la madre alejarse de ella más de unos veinte metros. Pese a que los miembros de la manada suelen hacer sus actividades juntos, como alimentarse, la hembra cambió de actitud y no se separó en ningún momento de su cría. Como la delfín del golfo de Arta, puso en riesgo su salud, aunque en este caso por un retoño vivo.

Un día Muller descubrió que el rebaño se comportaba de manera extraña. Diecisiete hembras, entre ellas la madre de la cría, permanecían inquietas y vigilantes al pie de unos arbustos. La pequeña jirafa había muerto allí hacía una hora. Aquella mañana todas las hembras manifestaron un gran interés por el cuerpo, al que se acercaban y del que luego se alejaban. Por la tarde había 23 adultas y cuatro jóvenes, algunas de las cuales empujaban el cadáver con el hocico. Esa noche, 15 hembras adultas levantaron un cerco en torno al cadáver, más cerca que durante el día.

A la mañana siguiente numerosas jirafas adultas acudieron junto a la cría fallecida. Por primera vez, lo hicieron también algunos machos, aunque no mostraron interés por ella y se dedicaron a ramonear o comprobar el estado reproductivo de las hembras. El tercer día, Muller reconoció a la madre sola, bajo un árbol a unos 50 metros de donde había muerto su retoño. El cadáver había desaparecido, pero tras emprender su búsqueda, Muller lo encontró semidevorado al pie del árbol donde la hembra había permanecido. Aquella noche las hienas debieron dar cuenta de él y no volvió a ver ningún rastro.

Las jirafas son animales muy gregarios. Después de criar al recién nacido lejos de todos hasta la cuarta semana de vida, las madres crean a veces una especie de guardería en la que una cuida de las crías mientras las demás comen. Muller no emplea las palabras «duelo» o «pesar» para describir el incidente que presenció, pero este caso es especialmente instructivo. Tanto la

conducta de la madre como la de otras numerosas hembras de la manada cambió de manera notoria a raíz de la pérdida de la cría. Aunque no pueden descartarse otras explicaciones, el hecho de que las jirafas desplegasen un cerco protector contra los depredadores alrededor de la cría supone una prueba de peso en favor de la existencia de duelo, al menos en cierto grado.

Por varios motivos, las observaciones minuciosas de poblaciones salvajes, como las de Muller, todavía escasean. Tal vez los científicos no se han encontrado ni en el lugar ni en el momento adecuados para observar las reacciones de los sobrevivientes ante la muerte. Y si lo han estado, puede que no surgieran conductas de duelo tangibles. En estas primeras fases del estudio del duelo animal, las observaciones en reservas de fauna, zoológicos e incluso en nuestros hogares podrían aportar datos fundamentales.

Me resulta imposible describir la conducta de la gata siamesa Willa sin pronunciar la palabra duelo. Durante 14 años la gata vivió con su hermana Carson en el hogar de Karen y Ron Flowe, en Virginia. Las dos hermanas se acicalaban, descansaban juntas en los rincones favoritos de la casa y dormían entrelazadas. Cuando Carson salía para ir al veterinario, Willa se mostraba algo intranquila hasta que esta regresaba. En 2011, los achaques crónicos de Carson empeoraron y sus amos la llevaron a la clínica veterinaria, donde murió sumida en un sueño profundo. Al principio, Willa se comportó como si su hermana se hubiera ausentado por poco tiempo. Pero al cabo de dos o tres días comenzó a proferir un sonido lúgubre, una especie de lamento, y a rebuscar por los rincones que solía compartir con Carson. Esta sorprendente conducta desapareció con el paso de los días, pero Willa permaneció sumida en la apatía durante meses.



UNA HEMBRA DE GORILA abraza a su bebé muerto en un zoológico de Münster. Aunque este comportamiento no basta para demostrar la existencia de duelo, las madres que pierden a un hijo se hallan entre los candidatos más firmes para experimentar el duelo del sobreviviente.

OLIVER WERNER, GETTY IMAGES

De todos los ejemplos de duelo animal que he recopilado, la historia más sorprendente proviene de una reserva de fauna. En 2006, tres patos mestizos (*mulard*) llegaron al refugio para animales de granja *Farm Sanctuary* en Watkins Glen (Nueva York). Sufrían lipidosis hepática, una enfermedad provocada por la alimentación forzada que recibían con el fin de elaborar el foie-gras. Dos de ellos, Kohl y Harper, llegaron con otros problemas físicos y anímicos. El primero era muy receloso y tenía las patas deformadas, mientras que el segundo era tuerto. Los dos forjaron una amistad solidaria durante cuatro años. Los patos son aves sociables, pero la fuerza de su vínculo resultaba inusual. Cuando la cojera de Kohl empeoró hasta el punto de impedirle caminar lo sacrificaron; a Harper se le permitió estar presente y acercarse a su compañero muerto. Después de empujar el cuerpo, Harper se acurrucó y apoyó la cabeza sobre el cuello de Kohl permaneciendo en esa postura por espacio de horas. Nunca se recuperó de su pérdida. Desde aquel día rechazó siempre a otros patos amigables y prefería sentarse junto a un pequeño estanque que solía frecuentar con Kohl. Dos meses después murió.

EL ESPECTRO DEL DUELO

Es lógico pensar que las especies longevas cuyos miembros viven en pareja, clanes familiares o comunidades cerradas tienen más posibilidades de sentir pesar por la pérdida de individuos cercanos. Pero aún no sabemos lo suficiente sobre el duelo animal para afirmarlo con seguridad. Se necesita contrastar esta hipótesis mediante la comparación minuciosa de las reacciones ante la muerte en diversos sistemas sociales animales, desde los gregarios hasta aquellos en que los individuos solo se congregan temporalmente con fines de alimentación o reproductivos.

Aun así, las diferencias en el duelo no solo se producen de una especie a otra, porque la variación en el contexto social inmediato y la personalidad propia de cada sobreviviente complican las cosas. Por ejemplo, la práctica de dejar ver el cuerpo sin vida a otros miembros del grupo, como en el caso de Harper con Kohl, parece evitar o mitigar en ciertas ocasiones el período de búsqueda y vocalización, pero otras veces parece servir de muy poco, lo que pone de manifiesto la idiosincrasia que domina las respuestas ante la muerte en una misma especie. Asimismo, los testimonios de duelo en monos salvajes que viven en grupos cerrados sorprenden por su escasez, mientras que en animales más solitarios, como el gato doméstico, pueden surgir vínculos entre parientes o amigos que dan lugar a manifestaciones de duelo equiparables a las de las especies más sociales. Me atrevo a augurar que las observaciones de campo

en simios de distintos sistemas sociales revelarán que algunos de ellos expresan su duelo de forma ostensible, a semejanza de algunos gatos domésticos. Las páginas de *How animals grieve* contienen ejemplos de gatos, perros, conejos, caballos y aves, así como de otros animales citados aquí. En todas las especies he advertido un espectro del duelo que abarca desde la indiferencia de algunos hasta el profundo pesar de otros por la muerte de un ser cercano.

Las diferencias cognitivas también desempeñan un papel en el duelo animal. Del mismo modo que el grado de empatía hacia un compañero varía entre las especies o entre los individuos de una misma especie, deben existir varios niveles de comprensión en la expresión del duelo. ¿Podrían algunos animales entender el carácter irreversible de la muerte o llegar a poseer un concepto de ella? Lo ignoramos. No existen indicios de que ningún animal sea consciente de la muerte de la misma manera que los humanos, una capacidad que impregna la literatura, la música, el arte y el teatro y nos supone un gran coste en términos de sufrimiento emocional.

En el reino animal, amor y duelo suelen guardar una estrecha relación

En efecto, el duelo puede convertirse en un pesado lastre para cualquier animal desde un punto vista físico y psíquico; sobre todo en la naturaleza, donde el estado de atención y alerta resulta fundamental para conseguir alimento, eludir a los depredadores y procrear. Entonces, ¿cuál es la razón de ser del duelo? Quizás el retraimiento social que a menudo lo acompaña, si no es excesivo, concede un tiempo de reposo para la recuperación emocional, lo que a su vez aumenta la posibilidad de forjar nuevos lazos íntimos. O, como John Archer escribe en *The nature of grief*, los costes que acarrea el duelo podrían considerarse como una contrapartida a los beneficios que ofrecen las respuestas de separación observadas cuando dos individuos íntimamente unidos son obligados a alejarse uno del otro. En tales circunstancias, los compañeros pueden buscarse, reencontrarse y seguir viviendo juntos. Por lo tanto, lo adaptativo no sería el duelo en sí, sino los fuertes sentimientos positivos experimentados antes de que este aparezca, los cuales favorecen la cooperación en la crianza o adquisición de recursos.

EL PRECIO DEL AMOR

Desde esta perspectiva, podemos vincular el duelo con el amor. Es decir, el duelo se produce como consecuencia del amor perdido. Después de haber estudiado los sentimientos en diversas especies, el ecólogo y etólogo Marc Bekoff, de la Universidad de Colorado en Boulder, secunda la idea de que numerosos animales sienten tanto amor como duelo, aunque reconoce que tales conceptos resultan difíciles de definir con precisión. Subraya que los humanos no entendemos por completo el amor, pero no por ello negamos su existencia ni su poder para modelar nuestras respuestas emocionales.

En su libro *Animals matter*, Bekoff relata la historia de una coyote llamada Mom a la que observó durante años en el transcurso de estudios etológicos en el Parque Nacional Grand Teton, en Wyoming. En un momento determinado, Mom comenzó a hacer breves escapadas en solitario lejos de su manada. Cuando regresaba sus cachorros la recibían con gran alegría: la lamían y se revolcaban eufóricamente a sus pies. Un buen día, Mom se marchó y no regresó jamás. Algunos coyotes de la manada siguieron con su vida como si nada hubiera pasado; otros, en cambio, salieron a buscarla por donde se había marchado. «Durante más de una semana el ambiente estuvo enrarecido. Su familia la añoraba», escribe Bekoff. Cuando hablamos con el investigador a inicios del presente año, este atribuyó la reacción de la familia a su amor por Mom. Según él, existe una elevada posibilidad de que especies como coyotes y lobos y diversas aves, como los gansos, sientan amor, pues las parejas reproductoras defienden el territorio, buscan alimento y crían a su prole juntas, y se añoran cuando permanecen separadas.

En el reino animal, amor y duelo suelen guardar una estrecha relación. Más que el grado de cohesión social dentro de la especie, quizá sea el amor entre los individuos el que prediga cuándo se expresará el duelo. ¿Alguien puede dudar de que Willa, miembro de una especie (el gato doméstico) que no destaca por la sociabilidad, quería a su hermana Carson?, ¿o que su pérdida no le causó dolor?

En los humanos, el duelo comenzó a expresarse de manera gradual a través de rituales cargados de simbolismo. Hace unos 100.000 años, nuestros antepasados pintaban a los difuntos con ocre rojo, una conducta que los arqueólogos interpretan como un tipo de ornamentación simbólica, más que funcional. Hace 24.000 años, en un lugar de Rusia llamado Sunghir, un niño y una niña menores de 13 años fueron enterrados juntos con un ajuar funerario que incluía colmillos de mamut y tallas zoomorfas de marfil. De modo sorprendente, se hallaron miles de cuentas de marfil en la tumba, quizá cosidas en su día a la vestimenta con la que fueron enterrados los niños. Buena parte de los antiguos pobladores de Sunghir tuvieron que participar en los preparativos del entierro, porque confeccionar cada cuenta debió requerir cerca de una hora de trabajo, tal vez más. Extrapolar sentimientos modernos a poblaciones humanas primitivas resulta arriesgado, pero los ejemplos de duelo animal que hemos presentado aquí refuerzan la interpretación emocional del registro arqueológico: nuestros remotos antepasados lamentaban la muerte de sus pequeños.

En la actualidad, el duelo no solo se demuestra por la pérdida de parientes, amigos o miembros cercanos de la comunidad. Las conmemoraciones públicas, como la del Parque Memorial de la Paz en Hiroshima, el Centro en Memoria del Genocidio de Kigali, en Ruanda, el Monumento a los judíos asesinados en Europa, en Berlín, el sitio de las Torres Gemelas en Manhattan o la Escuela de Primaria de Sandy Hook en Newtown (Connecticut), transmiten visiblemente el poder del duelo global. Nuestra singular capacidad para llorar la muerte de personas extrañas tiene su origen en nuestro acervo evolutivo. Tal vez nuestra expresión del duelo sea única, pero la capacidad para sentir un hondo pesar por la muerte de un congénere representa un rasgo que compartimos con los animales.

PARA SABER MÁS

Animals matter: A biologist explains why we should treat animals with compassion and respect. Mark Bekoff. Shambhala, 2007.
How animals grieve. Barbara J. King. University of Chicago Press, 2013.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Clac vegetal y gancho de gamba

Aprovechando la mecánica de superficies curvas semirrígidas, ciertos animales y plantas efectúan unos movimientos asombrosamente rápidos

Para hacerse con una presa, hay que actuar con rapidez y fuerza. ¿Cómo lograrlo cuando se es una planta carnívora, carente de músculos, o una gamba? Pues almacenando energía en forma elástica y liberándola de golpe. La dionea atrapa moscas (*Dionnaea muscupula*) cierra así sus mandíbulas vegetales en una décima de segundo; la gamba mantis (*Odontodactylus scyllanus*) asesta un «puñetazo» en dos milisegundos. Punto en común de ambos ases de la rapidez: almacenan energía elástica en un tabique elástico curvo.

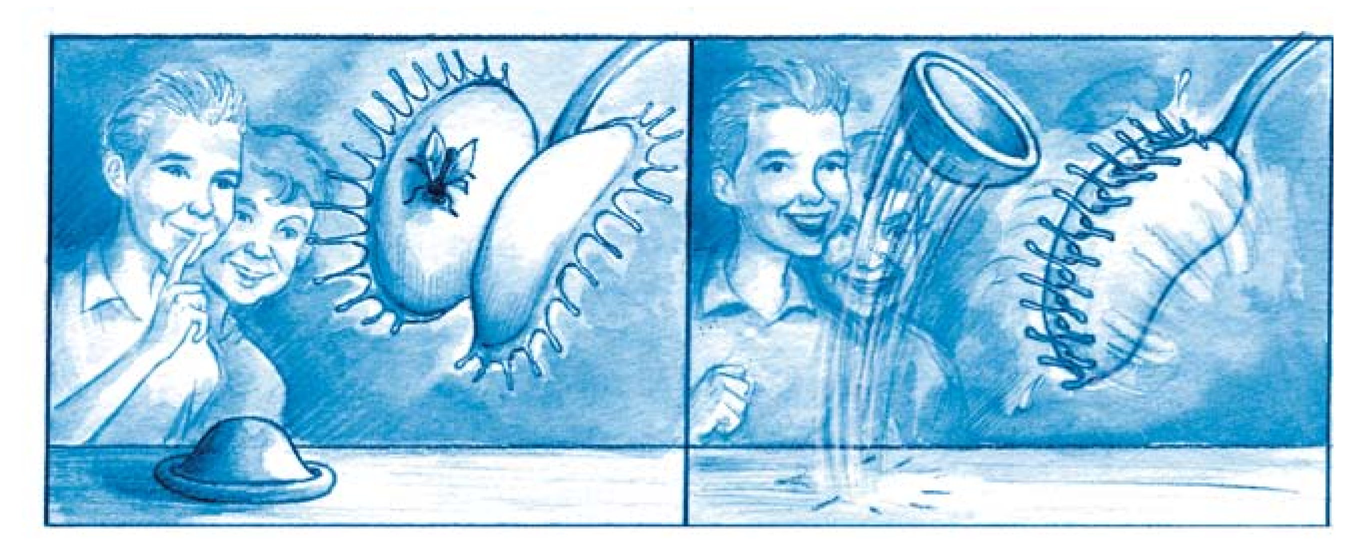
Un cierre relámpago

La trampa de la dionea se compone de dos hojas enfrentadas. Cuando un insecto se posa en una de las caras internas de sus mandíbulas vegetales, estas se cierran de golpe y capturan la presa, que a continuación será lentamente digerida. ¿Cómo produce la planta ese movimiento, por añadidura tan rápido? Gracias a un mecanismo análogo al que obra en las flores, que se abren por la mañana y se cierran en el crepúsculo.

Para controlar su contenido en agua y la presión interna, las células modifican la concentración de ciertos iones mediante el proceso de ósmosis. Cuando aumenta la concentración iónica en el interior de una célula, esta aspira agua a través de las paredes y se infla. Se trata de un fenómeno reversible: cuando disminuye la concentración iónica, la célula se desinfla. En un pétalo, ambos efectos se producen a la vez: las células de una de las caras del pétalo se inflan mientras que las de la otra cara se desinflan. La primera se torna convexa; la segunda, cóncava. Las modificaciones de la presión celular se traducen, pues, en movimientos macroscópicos.

¿Qué ocurre en la dionea? Las células de la cara externa de las dos hojas de la trampa son muy alargadas; se disponen a lo largo de la superficie de la hoja y perpendicularmente al eje que une las dos hojas. Las paredes de estas células se hallan además reforzadas con microfibrillas laterales que obstaculizan un inflado uniforme. Todo cambio de volumen de esas células se traduce esencialmente en un alargamiento. Puesto que las células de la cara interna se deforman muy poco, se modifica la curvatura de la hoja, inicialmente convexa (encorvada hacia dentro).

Cuando un infortunado insecto toca un cilio de la dionea, las células mecanotransductoras crean una señal que estimula las células y las hace engrosar por



LA PULGA, juguete en forma de gorro que se vuelve del revés, invierte de golpe su curvatura, lo cual le permite saltar en el aire y divertir a los niños. Antes de esa transición violenta, la superficie elástica se deforma lentamente, hasta llegar al umbral de la transición. La dionea, planta carnívora, hace uso de un mecanismo análogo: el insecto que se posa en la cara interna de la hoja desencadena una reacción fisiológica que deforma poco a poco las hojas. Al cabo de un tercio de segundo, la curvatura de estas cruza un umbral y la trampa se cierra en una décima de segundo.

BRUNO VACARO

ósmosis. La curvatura de la hoja cambia hasta invertirse de golpe, atrapando al insecto entre ambas hojas.

Pero, entonces, ¿por qué ese cierre es tan fulgurante, mucho más rápido de lo que permiten las transferencias de agua a través de las membranas celulares? Todo se aclara cuando lo comparamos con la inversión de curvatura de la pulga, el pequeño juguete elástico de forma hemisférica que salta en el aire cuando se le da la vuelta (*véase la ilustración*). El principio mecánico puesto en juego es el mismo.

Como ejemplo tomemos una hoja plana: podemos plegarla fácilmente en uno u otro sentido. No es este el caso de una superficie curva, tal como un casquete esférico. Cuando pretendemos aplanar esa superficie reduciendo la curvatura según una dirección, se comprueba que se repliega en la dirección perpendicular, lo que genera unas fuerzas que se oponen a la deformación deseada.

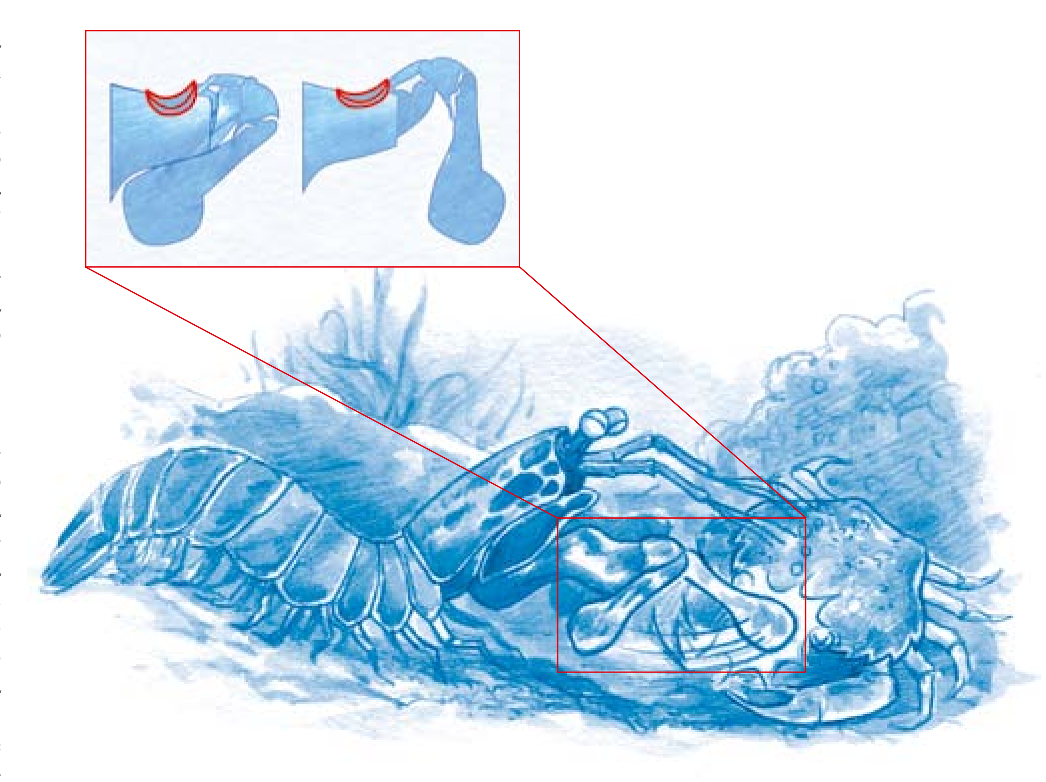
La dinámica de la deformación que invierte la curvatura depende de la naturaleza del material. Si este es muy elástico, se generan unas fuerzas antagónicas moderadas y, por tanto, la curvatura disminuye y se invierte de forma gradual. En cambio, si el material es poco elástico, se crean unos esfuerzos muy intensos y el material pasa de golpe de una forma a la otra, del mismo modo que una viga comprimida pandea repentinamente. Se trata de la inestabilidad al pandeo, transición drástica entre dos estados estables.

La velocidad de ese basculamiento está regida por un único parámetro, determinado por las características geométricas del material (espesor, longitud, curvaturas iniciales). Es tanto mayor cuanto menor es el espesor del material, y cuanto mayor es su longitud o su curvatura. Sin embargo, esa rapidez tiene un precio, ya que el retraso entre el inicio del movimiento y el basculamiento también aumenta.

Retornando a la dionea, la naturaleza está bien hecha: la geometría de sus hojas corresponde al umbral de inestabilidad de sus superficies. Este excelente compromiso corresponde a una fase preparatoria de un tercio de segundo y a un cierre en una décima de segundo. Si la hoja fuese menos rígida, el cierre sería demasiado lento; si fuese más rígida, la fase preparatoria duraría demasiado. En ambos casos, el insecto se escaparía.

De una propiedad análoga hace uso la gamba mantis, que ataca a cangrejos y otros animalitos perforándoles el caparazón. Si bien tiene músculos, estos no pueden explicar tan espectaculares características. La velocidad del golpe varía entre 14 y 24 metros por segundo, su brazo se mueve a una velocidad de rotación de 670 a 990 radianes por segundo y la aceleración puede alcanzar de 60 a 114 kilómetros por segundo al cuadrado, o sea, unas 10.000 veces la aceleración de la gravedad. ¡Y todo ello en solo 2,4 milisegundos!

La potencia necesaria por unidad de masa es del orden de $4{,}7 \times 10^5$ vatios por kilogramo. Este valor es por lo menos 100 veces superior a las posibilidades de un músculo. Ello requiere almacenar de antemano esa energía. ¿Y por qué no en forma elástica? Más aún, la tensión necesaria es muy superior a la que soporta un tendón o un músculo. Por consiguiente, el «resorte» puesto en juego debe trabajar a compresión. Para actuar rápidamente, no debe ser masivo, pero sí resistente.



BRUNO VACARO

LA GAMBA MANTIS asesta un golpe con su pata en dos milisegundos. Para golpear con tal rapidez, el crustáceo ha almacenado antes energía elástica en un elemento de su caparazón en forma de silla de montar (*rojo*). La «patada» corresponde a una distensión violenta de ese resorte, al que releva un sistema de brazo articulado para amplificar el movimiento.

Energía en una silla de montar

Por el riesgo de pandeo, no conviene un vástago. ¿Qué, entonces? Lo mismo que la dionea, la gamba mantis almacena su energía en una superficie elástica, aquí en forma de silla de montar. En una primera etapa, esta superficie se deforma gradualmente por acción muscular; no recupera su forma inicial gracias a un dispositivo de trinquete. En una segunda etapa, se suelta el «resorte» y un complejo sistema mecánico de brazo articulado transforma aquella pequeña compresión en un movimiento de gran amplitud. Las dos palancas sucesivas son muy disimétricas: la primera, muy corta, inicia un movimiento de rotación que la segunda, mucho más larga, transforma en movimiento lineal. El golpe es de tal rapidez que produce cavitación, es decir, la aparición de burbujas en el seno del agua, fenómeno que sin duda participa en el quebrantamiento del caparazón de la presa.

PARA SABER MÁS

Deadly strike mechanism of a mantis shrimp. S. N. Patek et al. en *Nature*, vol. 428, págs. 819-820; 2004.
How the Venus flytrap snaps. Y. Forterre et al. en *Nature*, vol. 433, págs. 421-425; 2005.

por Gabriel Uzquiano

Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de California del Sur.

Preguntas y respuestas

Cómo utilizar códigos de Hamming para incrementar las probabilidades de éxito

Andrés, Bernardo y Clara forman un equipo que participa en un concurso de televisión. El juego consiste en responder preguntas pertenecientes a tres categorías: astronomía, biología y computación. Cada uno de los participantes es un erudito en dos de esas áreas, pero apenas conoce nada sobre la tercera: Andrés es especialista en biología y computación, pero no sabe nada de astronomía; Bernardo destaca en computación y astronomía, pero nunca se interesó por la biología; Clara, por último, es experta en astronomía y biología, pero ignora las ciencias de la computación.

Cada ronda consta de tres preguntas de tipo *sí* o *no*: una de astronomía, otra de biología y otra de computación. Cada miembro del equipo debe contestar una de esas preguntas, pero sin recibir ayuda de sus compañeros. Si desconoce la respuesta, puede inhibirse y dejarla sin contestar. Para ganar la ronda, el equipo debe acertar al menos una pregunta y no fallar ninguna.

Cada participante es capaz de responder correctamente cualquier pregunta relativa a sus dos áreas de especialización. Sin embargo, la probabilidad de que acierte la respuesta en la disciplina que desconoce es solo 1/2, ya que solo puede contestar al azar. Todas las preguntas se formulan al principio de cada ronda.

Por desgracia, no son los concursantes quienes deciden quién responde a cada pregunta, sino el presentador. Pero este, conocedor del nivel de erudición de cada participante en sus respectivas disciplinas, ha decidido asignar las preguntas de la siguiente manera: Andrés deberá responder las de astronomía, Bernardo se enfrentará a las de biología, y Clara, a las de computación.

¡Qué desastre! Cada miembro del equipo deberá enfrentarse al área que desconoce. El problema que vamos a analizar consiste en diseñar una estrategia que permita a los concursantes aprovechar sus conocimientos en las dos disciplinas restantes para maximizar las probabilidades de éxito. En concreto, veremos que existe una estrategia que eleva las probabilidades de éxito en cada ronda hasta 3/4.

Respuesta correcta			*Respuesta de los concursantes*			
Astronomía	**Biología**	**Computación**	**Andrés**	**Bernardo**	**Clara**	**Resultado**
No	No	No	«Sí»	«Sí»	«Sí»	Ningún acierto
Sí	No	No	«Sí»	Pasa	Pasa	Un acierto; ningún fallo
No	Sí	No	Pasa	«Sí»	Pasa	Un acierto; ningún fallo
No	No	Sí	Pasa	Pasa	«Sí»	Un acierto; ningún fallo
Sí	Sí	Sí	«No»	«No»	«No»	Ningún acierto
No	Sí	Sí	«No»	Pasa	Pasa	Un acierto; ningún fallo
Sí	No	Sí	Pasa	«No»	Pasa	Un acierto; ningún fallo
Sí	Sí	No	Pasa	Pasa	«No»	Un acierto; ningún fallo

Callar a tiempo

Parece sumamente difícil. Las estrategias que primero vienen a la cabeza no prometen gran cosa:

Estrategia 1: Cada concursante responde *sí* o *no* de manera aleatoria.

En ese caso, los tres deberán acertar para que no haya ninguna respuesta incorrecta. La probabilidad de que eso suceda no es más que $1/2^3 = 1/8$.

Estrategia 2: El equipo nombra un capitán, el cual será el único que dará una respuesta. Los otros dos concursantes pasan ronda sin responder, confiando en que el capitán atine.

La probabilidad de éxito asciende ahora a 1/2. Lo que, por otra parte, no está nada mal en comparación con la primera estrategia.

Merece la pena notar que ninguno de los métodos anteriores permite a los concursantes utilizar sus amplios conocimientos en sus respectivas áreas de especialización. Para remediarlo, suponga-

mos ahora que nuestros amigos adoptan la siguiente estrategia:

Estrategia 3: Cada concursante escucha con atención las preguntas que deberán responder sus compañeros. Ambas pertenecen a sus áreas de especialización, por lo que, aunque no pueda contestarlas, sabe si la respuesta correcta es *sí* o *no*. Si la respuesta correcta es idéntica en ambos casos (*sí*, *sí*; o *no*, *no*), el concursante responderá a su propia pregunta de modo contrario (*no* o *sí*, respectivamente). Si las respuestas correctas no coinciden (*sí*, *no*; o *no*, *sí*), el concursante se inhibirá y dejará la pregunta sin contestar.

La estrategia parece clara. Para convencernos de que permite aumentar las probabilidades de éxito hasta 3/4, merece la pena examinar las ocho posibilidades a las que se enfrentan los concursantes. Estas figuran en la tabla adjunta. Las tres primeras columnas detallan las respuestas correctas en cada categoría, mientras que las tres columnas siguientes indican cómo debería contestar cada concursante de acuerdo con la estrategia. La última columna muestra el resultado de la ronda.

Como podemos ver, cuando uno de ellos se equivoca, todos lo hacen. Y cuando el equipo gana, lo logra con una sola respuesta correcta. Sin embargo, observamos que el equipo solo pierde en dos de las ocho situaciones posibles, de lo que se sigue que nuestra estrategia garantiza una probabilidad de éxito de 3/4, tal y como habíamos prometido.



Secuencias protegidas

La situación que hemos propuesto corresponde a una variante de un problema ideado por el informático Todd Ebert, quien lo introdujo en 1998 en su tesis doctoral para la Universidad de California en Santa Bárbara. El problema original proponía una situación análoga con sombreros de colores. Algo después, Ebert planteó a sus estudiantes una generalización a siete personas. En el contexto que nos ocupa, tendríamos siete concursantes a quienes el presentador formularía siete preguntas en otras tantas disciplinas.

La solución al caso más general emplea ideas de la teoría de la información. Supongamos que deseamos comunicar un dígito, 0 o 1, a través de un medio que puede sufrir errores de transmisión: dada una secuencia de dígitos, existe el riesgo de que uno de ellos llegue invertido al destinatario.

Para eliminar la posibilidad de que un fallo semejante distorsione el mensaje, podemos emplear el siguiente código: la secuencia 000 corresponderá al mensaje ‘0’, y la secuencia 111 al mensaje ‘1’. Esto nos garantiza que, aunque uno de los dígitos se corrompa por el camino, el receptor entenderá el mensaje.

Si deseamos enviar el mensaje ‘0’, transmitiremos la secuencia 000. Como existe el riesgo de que un dígito se corrompa, puede que nuestro interlocutor reciba las secuencias 100, 010 o 001. Sin embargo, todas ellas difieren de la secuencia «protegida» 000 en solo un dígito, por lo que el destinatario siempre podrá reconstruir el mensaje original. Por otra parte, cualquiera de las secuencias 011, 101, 110 deberán interpretarse como ‘1’, ya que difieren en tan solo una cifra de la secuencia protegida 111.

Clasificadas de esa manera, las secuencias de tres dígitos forman un código de Hamming. Esta clase de códigos debe su nombre al informático Richard Hamming, quien los desarrolló en 1950. En el caso que nos ocupa, la técnica consiste en agrupar todas las secuencias de tres dígitos en dos categorías: aquellas que difieren a lo sumo en una cifra de la se-



cuencia protegida 000, y aquellas que difieren a lo sumo en una cifra la secuencia protegida 111:

```
000 111
100 011
010 101
001 110
```

Si ahora asociamos los dígitos 1 y 0 a las respuestas *sí* y *no*, respectivamente, podemos reinterpretar la solución al problema del concurso de televisión de la siguiente manera:

Estrategia de Hamming: Cada concursante escucha con atención las preguntas formuladas a sus compañeros. Si las respuestas correctas en cada caso resultan compatibles con alguna de las secuencias protegidas (000 o 111), entonces el participante contestará de tal modo que la secuencia final no coincida con ellas. En caso contrario, se inhibirá y pasará ronda sin responder.

Si Andrés ve que las respuestas correctas a las preguntas de biología y computación son ambas negativas, percibirá una secuencia que podemos escribir como ×00. Esta resulta compatible con la secuencia protegida 000, por lo que, a fin de evitarla, contestará *sí*. Si las respuestas correctas fuesen negativas, Andrés se hallaría ante la secuencia ×11, compatible con 111. Para evitarla, respondería a su pregunta con un *no*.

Si la secuencia de respuestas correctas coincide con una de las secuencias protegidas, entonces los tres participantes fallarán. Sin embargo, en el resto de las situaciones solo responderá uno de ellos, quien, además, lo hará de manera correcta.

Siete participantes

Ahora ya podemos generalizar el problema a siete concursantes. En este caso las respuestas correctas pueden formar hasta $2^7 = 128$ combinaciones de siete dígitos. Por tanto, deberemos identificar 16 secuencias protegidas y clasificar las 128 configuraciones posibles en 16 grupos de 8 combinaciones que, a lo sumo, difieran en un solo dígito de cada una de las secuencias protegidas ($16 \cdot 8 = 128$). Las siguientes combinaciones de siete dígitos podrían contar como secuencias protegidas:

```
0000000 0101010 1001011 1100001
0000111 0101101 1001100 1100110
0011001 0110011 1010010 1111000
0011110 0110100 1010101 1111111
```

La clave consiste en asegurarnos de que dos secuencias protegidas cualesquiera difieran en al menos tres dígitos. Ahora, cada una de las 128 configuraciones posibles se diferenciará a lo sumo en un dígito de alguna de las 16 secuencias protegidas. Esta propiedad nos permite clasificarlas en 16 grupos de 8 configuraciones, según cuál sea la secuencia protegida más «cercana». Por ejemplo, dado que 0000000 coincide con una de las secuencias protegidas, el grupo correspondiente vendría dado por:

```
0000000 1000000 0100000 0010000
0001000 0000100 0000010 0000001
```

Vemos que la primera combinación coincide con la secuencia protegida, mientras que las demás difieren de ella en un solo dígito.

Una vez hemos fijado las 16 secuencias protegidas, la estrategia puede formularse como sigue:

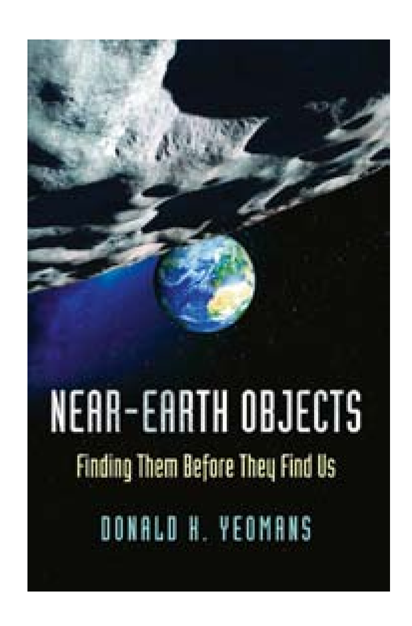
Estrategia para siete concursantes: Cada uno escucha las preguntas de sus compañeros. Si la respuesta correcta en cada caso resulta compatible con una de las 16 secuencias protegidas, el concursante contestará de tal modo que evite dicha secuencia. En caso contrario, pasará ronda.

Al igual que antes, el equipo fallará todas las preguntas en aquellos casos en los que la secuencia de respuestas correctas coincida con una de las secuencias protegidas (por ejemplo, 0000000, en cuyo caso todos los participantes responderán de modo afirmativo). Sin embargo, en cualquier otra situación todos los miembros del equipo menos uno se inhibirán, y el que responda lo hará correctamente.

Si la secuencia de respuestas correctas fuese 1000000, por ejemplo, todos excepto uno pasarán ronda sin contestar y, quien lo haga (Andrés, en este caso) dará con la respuesta correcta. Dado que solo existen 16 secuencias protegidas, la estrategia garantiza el éxito con una probabilidad de $(128 - 16)/128 = 7/8$.

PARA SABER MÁS

Todd Ebert es profesor de ciencias de la computación en la Universidad de California en Long Beach. En el problema que planteaba a sus estudiantes, siete personas podían ver el color del sombrero de las demás, pero no el suyo propio. Dados dos colores, el objetivo consiste en diseñar una estrategia que permita que al menos una persona adivine el color de su sombrero sin que nadie se equivoque. Una buena introducción divulgativa sobre la importancia del problema es **Why mathematicians now care about their hat color** (S. Robinson en *The New York Times*, 10 de abril de 2001) .



NEAR-EARTH OBJECTS: FINDING THEM BEFORE THEY FIND US

Por Donald K. Yeomans. Princeton University Press; Princeton, Nueva Jersey, 2013.

Objetos próximos a la Tierra

Claves sobre el origen del sistema solar y de la vida

A lo largo y ancho del sistema solar pululan sin cesar asteroides, cometas y meteoroides. Sus trayectorias no se cruzan muy a menudo con la de la Tierra, debido a las inmensas distancias que nos separan y a su tamaño relativo. Sin embargo, de vez en cuando pueden darse las condiciones para un encontronazo, tal como ha ocurrido últimamente en más de una ocasión.

Es el caso del asteroide 2012 DA14, de unos 30 metros de diámetro, y cuya trayectoria se acercó considerablemente a la de la Tierra, pasando a tan solo 28.000 kilómetros de su superficie. El pasado 15 de febrero muchos telescopios observaban con atención el avance de dicho cuerpo celeste hacia nosotros; por supuesto, este no debía impactar con nuestro planeta, pero su cercanía lo hizo interesante a ojos de la ciencia. La sorpresa fue general al llegar noticias desde la Rusia siberiana, tan solo unas horas antes de tan esperado suceso, sobre la caída de un meteorito y los asombrosos daños que había causado la onda expansiva de la explosión que aconteció cuando el objeto celeste impactó con la atmósfera. En un principio, se pensó que un pedazo de roca se había desprendido del asteroide 2012 DA14, causando tal evento. Sin embargo, estudios de trayectorias realizados instantes después revelaron que los dos objetos no guardaban relación alguna entre sí, ya que provenían de lugares distintos del sistema solar.

Una de las preguntas que se generó a raíz del espectacular suceso ocurrido en cielo ruso fue por qué no se había detectado un objeto capaz de infligir tanto daño a pequeña escala. La respuesta a esta cuestión está directamente ligada a la capacidad de resolución de los telescopios actuales: todavía no es posible detectar objetos celestes tan pequeños antes de que se encuentren a una distancia muy reducida de la superficie de la Tierra, y más aún si el suceso se produce en la cara diurna de la misma, mostrando un meteoroide oscuro. Debe tenerse en cuenta que los eventos de este tipo se producen con una frecuencia muy baja (alrededor de uno cada 100 años), si bien es común que circulen asteroides cerca de nuestro planeta.

Tan solo unas semanas después del doble suceso volvió a ser noticia otro objeto que se había acercado a la Tierra, aunque en esta ocasión pasó más allá de la Luna, a unos 150.000 kilómetros de nosotros. Con todo, este tipo de fenómenos no acostumbra a salir en los medios ya que son extremadamente comunes.

Entonces, ¿por qué últimamente se ha hablado tanto de asteroides y meteoroides y sus posibles impactos en la superficie terrestre? Pues simplemente porque ahora hay muchos ojos mirando y se detectan eventos que hace décadas era impensable observar. Desde el Centro de Objetos Cercanos a la Tierra del Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL) de la NASA se está constantemente alerta de posibles peligros de origen extraterrestre. Científicos de este centro observan en todo momento el firmamento, descubriendo objetos celestes y monitorizando sus trayectorias. De todo esto habla de forma muy clara y didáctica Donald K. Yeomans, investigador del JPL, en su libro *Near-Earth objects: Finding them before they find us*.

Es importante mencionar, también, que los objetos extraterrestres han sido objeto de estudio desde que se tiene constancia de ellos, debido a las pistas que transportan sobre el origen del sistema solar en el que vivimos y también sobre el origen de la vida misma. Nuestro entorno celeste se formó en una nube protoestelar, el colapso de la cual dio lugar a nuestra estrella, el Sol, en su centro y a un reguero de planetas y planetoides de distintos tamaños entre los cuales se encuentra la Tierra. Indicios sobre este proceso son los que se pueden encontrar en los materiales de los que están compuestas las rocas provenientes del espacio.

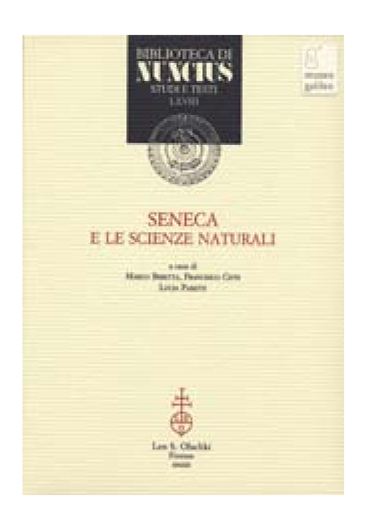
Esos objetos extraterrestres pueden ayudarnos también a entender el origen de la vida. Numerosas teorías científicas nos hablan de que tal vez esta se habría originado fuera de nuestro planeta y que los impactos de asteroides con la Tierra podrían haber transportado hasta aquí parte del caldo cósmico que dio lugar a la vida tal como la conocemos hoy.

El libro empieza contando la experiencia de una chica californiana que, yendo en coche, se cruzó en el camino de un meteorito. Este le destrozó el vehículo, pero ella pudo resarcirse gracias a la venta de los pedazos de meteorito por una suma muy importante. A partir de ahí, Yeomans expone de forma clara y precisa el interés que suscitan los meteoritos para entender de dónde venimos.

Se trata de una publicación apta para expertos y perfectamente entendible para no expertos. Si bien la narración es neutra y sin carga emotiva, el conjunto resulta de interés para estudiantes de la materia porque ilustra de forma sencilla el origen, la composición y el interés que genera este tipo de objetos. Asimismo, los capítulos presentan una estructura de notable interés didáctico: cada uno cierra con un breve sumario de todo lo expuesto en él, permitiendo al lector recordar las ideas más importantes.

El libro finaliza mencionando cada uno de los impactos de meteoritos de tamaño considerable que se han producido en la Tierra y las consecuencias de los mismos. Sin duda, una obra interesante para los amantes de la astronomía y para todo aquel que quiera saber más sobre objetos cercanos a la Tierra.

—Anna Artigas
Universidad Autónoma de Barcelona



SENECA E LE SCIENZE NATURALI

Dirigido por Marco Beretta, Francesco Citti y Lucia Pasetti. Leo S. Olschki editore; Florencia, 2012.

Ciencia hispanorromana

La física estoica de Séneca

Lucio Anneo Séneca (4 a.C.-65 d.C.), famoso por su compromiso con la filosofía estoica, volvió al final de su vida al cultivo de la ciencia que le había apasionado en su juventud. Su obra clave, *Naturales quaestiones*, revisa en un latín depurado y austero el estado de la física griega e introduce puntos de vista propios que funda en la observación de los fenómenos. Desde 1977, los castellanohablantes disfrutan de una edición bilingüe de ese libro capital de la historia de la ciencia, publicada por Carmen Codoñer en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

No caeremos en anacronismo si situamos las *Naturales quaestiones* entre las obras iniciales de la ciencia hispanorromana, precursora de la visigótica. Esa conciencia de procedencia española se tenía ya en el alba de la era cristiana. Realidad que una mente lúcida y equilibrada, así la de Séneca, compagina con el sinsentido de las barreras políticas: «*O quam ridiculi sunt mortalium termini! Ultrum Istrum Dacis non exeat imperium, Haemo Traces includat; Parthis obstet Euphrates; Danuuius Sarmatica ac Romana disterminet; Rhenus Germaniae modum faciat; Pyrenaeus medium inter Gallias et Hispanias iugum extollat; Inter Aegyptum et Aethiopas harenarum inculta uastitas iaceat*». («Ah, cuán ridículas son las fronteras de los mortales. Que el poder de los dacios no se extienda sobre el Híster; que el Hemón confine a los tracios; que ante los partos se levante el Eúfrates; que el Danubio delimite el territorio sármata y el romano; que el Rin ponga freno a Germania; que el Pirineo levante sus cumbres entre las Galias e Hispania; que un inmenso arenal yermo se extienda entre Egipto y Etiopía.») Una Hispania que considera el punto de referencia del occidente de la Tierra: «*Quantum est enim quod ab ultimis litoribus Hispaniae usque ad Indos iacet?*» («¿Qué espacio es el que separa el más distante litoral de Hispania de las Indias?»)

Cuestión casi siempre espinosa en los libros anteriores a la imprenta es el de su fecha exacta de composición. Pero aquí disponemos de datos objetivos y subjetivos que acotan el momento con suficiente precisión. A los primeros pertenece la referencia al terremoto de Campania, cuando Séneca ha abandonado la vida política. Por lo que concierne a los datos subjetivos, reseñemos las alusiones constantes a la vejez y la dedicatoria de la obra a Lucilius Iunior. Se ha escrito que el estilo de Séneca es «dramático», atormentado, que refleja un alma en guerra consigo misma. No solo se predica de las partes filosófico-morales de las *Naturales quaestiones* (sobre todo proemios y epílogos), sino también de las partes más estrictamente técnicas. El texto, complejo y abierto a muchos niveles de lectura. Por otro lado, cualquier discusión sobre la originalidad de Séneca queda inevitablemente cuestionada, condicionada por el hecho de que las obras de sus predecesores se han perdido.

Las *Naturales quaestiones* constan de ocho libros, dos de ellos incompletos, el 4a y 4b. Se percibe una clara afinidad entre el libro I (*De ignibus coelestibus*) y el II (*De fulminibus et tonitruis*), basada en el carácter ígneo de ambos fenómenos. En efecto, el formato básico de las *Naturales quaestiones* es una serie de estudios sobre fenómenos particulares o cúmulos de fenómenos (ríos en el libro 3, el Nilo en el libro 4a y precipitaciones atmosféricas en el 4b). En las *Naturales* senequistas, como en cualquier otro texto de la Antigüedad clásica sobre la naturaleza de las cosas, ocupan un lugar central los cuatro elementos primordiales, que indicó Empédocles y codificó Aristóteles: agua, tierra, fuego y aire.

El trabajo bascula en torno a un común denominador: el universo, creación de la divinidad, y fenómenos con él relacionados. Moralista a la postre, entiende que ese conocimiento debe repercutir en una vida más acorde con la naturaleza humana. Vuelve una y otra vez sobre la física griega. Pero resalta la importancia de abordar los problemas y resolverlos por uno mismo y aceptar las explicaciones ajenas cuando vienen avaladas por pruebas, no por una autoridad. Séneca nunca percibió la diferencia entre ciencia y filosofía. Para él la verdad científica se establecía por argumentación más que por experiencia. Las leyes naturales regulaban incluso el curso de fenómenos invisibles a nuestros ojos, a la manera de cuanto sucedía en meteorología y en astronomía. Son frecuentes sus referencias a las leyes naturales y a su estatuto epistemológico. Comparte ese enfoque con Lucrecio, al que probablemente estudió. Uno y otro se sirven de la observación de la naturaleza para emancipar al hombre de la superstición.

Revela una fe incondicional en el poder, regulado por leyes inmutables, de la providencia, una providencia que manifiesta la propia voluntad a través de fenómenos aparentemente irregulares, como los cometas que, justamente por su excepcionalidad, preanuncian lo que sucederá en el futuro. Niega que se originaran de la conjunción de planetas. Y para explicar el significado premonitor de los cometas, Séneca, polemizando con Aristóteles, defendía que ellos preanunciaban acontecimientos no demasiado inminentes en el tiempo, como el viento o las lluvias. Por consiguiente, al igual que otros fenómenos astronómicos, deberían considerarse dentro de una investigación más amplia del universo.

Pormenorizando, el libro segundo, completo y el más largo, se estructura en una exposición introductoria de las ramas de la ciencia física: astronomía, meteorología y ciencias de la tierra (*caelestia, sublimia, terrena*). Esta triple división constituye la clave programática de la obra entera. Se detiene en las propiedades del aire (*spiritus* = *pneuma*), entendido como parte del mundo y como materia elemental componente. Analiza la tensión del aire, su composición y el movimiento.

Tales conceptos era obligado esclarecer antes de abordar la naturaleza del trueno, el rayo y el relámpago. De estos se ocupa la primera sección científica del libro segundo, donde encontramos una documentada exposición de las teorías que le precedieron. Entre esta primera sección y una segunda sección científica encontramos un apartado central consagrado a la adivinación a través del rayo.

Séneca habla en diversas ocasiones de la transformación de unos elementos en otros. Por ejemplo, de la transformación del aire en fuego; del aire en agua, hielo y nieve. La teoría de la transformación de los elementos expuesta por Aristóteles en el *De generatione et corruptione*, fue retomada con algunas variantes por el veteroestoicismo. Pero en particular volvemos a encontrarla en dos textos que a buen seguro tenía Séneca: el *De natura deorum*, de Cicerón, y las *Metamorfosis*, de Ovidio.

En el libro tercero, *De aquis terrestribus*, se concentran las referencias más abundantes a los elementos y su transformación. En particular insiste en la teoría mudable del elemento tierra. El agua, al ser un elemento, no puede agotarse ni tener un origen distinto del cosmos, del que constituye la cuarta parte. Sostiene la cooperación entre los cuatro elementos. Su desequilibrio cósmico llevaría al caos.

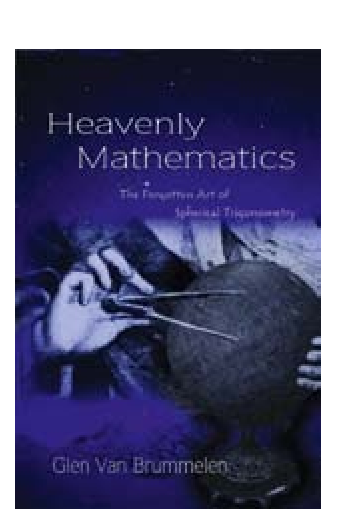
El interés de Séneca por el Nilo se manifiesta ya en la edad juvenil, período en que compuso *De situ et sacris Aegyptiorum*. En particular, la atención prestada a las características del Nilo —y sobre todo a sus avenidas, fenómeno estrechamente conexo con la fecundidad del valle nilótico entero— resulta fácilmente comprensible si se considera la importancia de las posesiones hacendísticas que el cordobés tenía en Egipto, de cuya existencia dan fe papiros documentales. El enigma de sus avenidas, que llenaron de estupor a los pueblos del Mediterráneo, acostumbrados a ver mermado su curso de agua durante los meses estivales, solo quedó resuelto en el siglo xix, cuando se descubrió la doble fuente del río: el Nilo Blanco y el Nilo Azul. El Nilo Blanco nace en los altiplanos ecuatoriales dominados por el lago Victoria, está alimentado por lluvias intensas que caen en el curso del todo el año. El Nilo Azul, por su parte, se origina en el lago Tana, en terreno etíope, que registra abundantes lluvias durante los meses estivales. Las avenidas son producidas, pues, por el Nilo Azul y el afluente Abbara y solo en mínima parte por el Nilo Blanco.

El libro VI de las *Naturales quaestiones* es un tratado sobre los terremotos, una materia de estudio apasionante a la que Séneca vuelve, tras haber escrito un libro en su mocedad. Durante su exilio en Córcega, apartado de toda vida pública, consuela a su madre Elvira y la invita a considerar feliz y activo a su hijo, ya que, privado de compromisos, puede dedicarse al conocimiento de sí mismo y de la naturaleza, la única ocupación digna del hombre: «*Qualem me cogites accipe: laetum et alacrem velut optimis rebus. Sunt enim optimae, quoniam animus omnis occupationis expers operibus suis vacat et modo se levioribus studiis oblectat, modo ad considerandum suam univesique naturam veri avidus insurgit*». («Debes pensarme así: con alegría y euforia, como si las cosas fueran bien. Y en verdad así van, porque el ánimo, liberado de toda preocupación, se dedica a las funciones propias y se entrega a estudios más ligeros o, ávido de severidad, se eleva para contemplar su naturaleza y la del universo.»)

La argumentación nace de la observación empírica del fenómeno, con el recuerdo del seísmo reciente que ha afectado a la Campania en el año 62 o 63. La descripción de los aspectos devastadores de esta catástrofe constituye el punto de arranque de un tratado científico que indague las causas naturales del terremoto y tenga por finalidad liberar al hombre del miedo que le sobrecoge en el momento en que descubre la inestabilidad de la tierra. Examina las teorías que van atribuyendo la causa de los seísmos sucesivamente a cada uno de los cuatro elementos: agua, etcétera. Séneca se adhiere a la tesis del aire. El conocimiento racional del fenómeno y de sus causas son objeto de la ciencia; muestra que los hechos no tienen nada de sorprendentes; son acontecimientos naturales, normales. Se cierra el capítulo con una larga reflexión sobre el miedo a la muerte, que envilece al hombre.

Resulta apenas conocido que en el siglo de la revolución científica, las *Naturales quaestiones* merecieron la atención de los protagonistas. A ellas se recurre para la exposición del método científico. Francesco Buonamici (1533-1603), profesor de Galileo en Pisa, las parafrasea para ilustrar el fenómeno del impulso hidrostático. Hasta en tres ocasiones cita Galileo a Séneca en la confrontación del sistema geocéntrico y el heliocéntrico. Se supone que el libro V de las *Naturales* fue una de las fuentes antiguas que leyó Evangelista Torricelli. Y en ellas se inspira Robert Boyle en *A free enquiry into the vulgarly received notion of nature.*

— Luis Alonso



HEAVENLY MATHEMATICS. THE FORGOTTEN ART OF SPHERICAL TRIGONOMETRY

Por Glen van Brummelen. Princeton University Press; Princeton 2013.

Trigonometría esférica

Indispensable ayer, hoy disciplina en riesgo de extinción

La trigonometría esférica es la aplicación de los métodos de la trigonometría al estudio de ángulos, lados y áreas de triángulos esféricos y otros polígonos. Un triángulo esférico es un triángulo construido sobre una esfera, con tres vértices y tres lados que son arcos de círculo máximo. Los ángulos de un triángulo esférico no suman 180 grados. De hecho, la suma puede hallarse entre 180 y 540 grados. Considérese, por ejemplo, un triángulo esférico con un vértice en el Polo Norte y los otros dos vértices en el ecuador de la Tierra. La resolución de triángulos esféricos adquiere particular importancia en astronomía y navegación para

determinar la posición de un buque en mar abierto mediante la observación de los astros.

A lo largo de los siglos, con sus funciones fundamentales (seno, coseno, tangente, cotangente, secante y cosecante), la disciplina constituyó el nervio de la educación matemática. Fue materia troncal en las escuelas superiores hasta los años cincuenta de la postrera centuria. Hoy apenas si se enseña. Se trata de una especie en extinción, cuya rica historia y persistente apogeo traza *Heavenly mathematics*. La Grecia clásica, el Islam medieval y el Occidente moderno utilizaron la trigonometría esférica para cartografiar el firmamento y la Tierra, como demuestra y actualiza Glen van Brummelen, coordinador de matemática y de ciencias físicas en la Universidad Quest, presidente de la Sociedad Canadiense de Historia y Filosofía de la Ciencia y autor, entre otros textos afines, de *The mathematics of the heavens and the earth: The early history of trigonometry* y *Mathematics and the historian's craft*.

Los contenidos de los manuales de matemáticas han cambiado drásticamente. En la mente de todos está la revolución traída por el colectivo Nicolas Bourbaki. Sin llegar a esa radicalidad, y abrimos un tratado de hace un siglo, reconoceremos temas que nos serán familiares, pero otros nos resultarán desconocidos o, cuando menos, desconcertantes. Un texto avanzado de geometría analítica, por ejemplo, contenía involutas de círculos, hipocicloides y círculos auxiliares de las elipses, cuestiones del todo ajenas al alumno de nuestros días. Pero será la trigonometría esférica el ejemplo mas espectacular de cambios en el aula de matemática del siglo xx. Todavía en el primer tercio, las ediciones de los *Elementos* de Euclides ideadas para el aula contenían apéndices obligados sobre trigonometría. Durante la Segunda Guerra Mundial, la popularidad de la trigonometría esférica persistió. Ocupaba un puesto destacado en la enseñanza y en la praxis naval y militar. Mas, poco a poco, fue relegándose hasta desaparecer de unos textos centrados ya de manera exclusiva en la trigonometría plana. Una pérdida que resulta particularmente sorprendente en unos momentos en que se están descubriendo nuevas aplicaciones. Algunas de las fórmulas del GPS se han construido sobre la misma. Ahora, muy pocos manuales, por ejemplo, se preguntan por qué $\text{sen}(\alpha + \beta) = \text{sen}\alpha \cdot \cos\beta + \cos\alpha \cdot \text{sen}\beta$. Pero eso es culpa de los manuales, no del tema.

Parece obvio que no podamos determinar las dimensiones de la Tierra midiéndola directamente y haya que recurrir a aproximaciones indirectas. La historia recoge uno de los primeros y más ingeniosos métodos, el de Eratóstenes de Cirene, astrónomo griego del siglo III antes de Cristo; se servía de la observación de la penetración de la luz solar en pozos de distintas localidades. Hiparco de Rodas, del siglo II a.C., natural de Bitinia, conocía los movimientos del firmamento. También los astrónomos babilonios que le precedieron. Pero Hiparco abrió un nuevo surco cuando examinó el movimiento del Sol. Hoy sabemos que el Sol viaja a lo largo de la eclíptica. Para averiguar cuánto se movía el astro de su centro, Hiparco inventó la función de la cuerda (que más tarde, en la India, se cambió en función seno) y, por tanto, fundó la ciencia de la trigonometría. Una vez convirtió Hiparco la longitud del día estacional en grados, todo lo que necesitaba para hallar la distancia de la Tierra al centro eran un par de longitudes de cuerda y geometría elemental. Fue la determinación de esa cantidad, la excentricidad de la órbita solar, lo que pudo haber sido el primer problema trigonométrico del mundo.

Una cosa es calcular el tamaño de la Tierra y otro aventurarse más allá de los límites de la Tierra y medir distancias, por ejemplo, de la Luna. Lo intentó Claudio Ptolomeo, científico alejandrino del siglo II d.C., quien llegó a un valor bastante aproximado. Ptolomeo calculó también la distancia al Sol, con mucha menor precisión. La clave está en la paralaje: el hecho de que dos observadores, situados en diferentes lugares, verán el mismo objeto en diferente posición con respecto al fondo distante. A Ptolomeo debemos también las primeras tablas trigonométricas. Su monumental *Colección matemática* contiene un conjunto notable de modelos sobre los movimientos de los cuerpos celestes. Situó la Tierra en el centro del universo (geocentrismo), una teoría que condicionó la astronomía a lo largo de un milenio y medio. Se tradujo al árabe con el título *Kitab al-majisti*, el *Almagesto*. El primero de esos libros contiene una descripción de cómo se puede construir una tabla trigonométrica con pluma y papel. (Ptolomeo empleó otra función, la cuerda.)

La revolución en la trigonometría geométrica llegó con la ilustración islámica en torno al primer milenio. Abu Sahl al-Kuhi vivió en Bagdad durante las últimas décadas del siglo x. Interesado en la astronomía, su estilo recordaba el de Euclides, Arquímedes y Apolonio. Considerado hoy el geómetra más importante del siglo x, también se le recuerda por un error desafortunado; al fiar demasiado en una analogía geométrica que había descubierto entre ciertas formas en su obra sobre centros de gravedad extrajo la conclusión de que $\pi = 3\ 1/9$. Abu Nasr Mansur ibn Ali ibn Iraq descubrió el triángulo polar. En el *Libro del azimuth* Abu Nasr propuso la regla de las cuatro cantidades, el primer ejemplo del principio de localidad. Imaginémonos un triángulo esférico cuyo tamaño se va encogiendo hasta que está a punto de desaparecer. A medida que va empequeñeciéndose comienza a parecerse a un triángulo plano. Por consiguiente, cualquier enunciado sobre un triángulo esférico, aplicado a un triángulo que se va encogiendo hasta casi desaparecer, se convierte en un enunciado sobre un triángulo plano. La regla de las cuatro cantidades está relacionada con un teorema mucho más conocido hoy, la ley esférica de los senos.

Discípulo de Nasr Mansur fue Abu al-Rayhan Muhammad ibn Ahmad al-Biruni (973-1050), quien escribió tratados sobre todas las ciencias conocidas de su tiempo: mecánica, medicina y mineralogía, además de matemáticas y astronomía. Su *Kitab Tahdid al-Amakin* (*Libro sobre la determinación de las coordenadas de las ciudades*) se inspiró originalmente en el problema de hallar la *qibla*, la referencia a La Meca, en cuya dirección los musulmanes deben rezar. El libro es una descripción exhaustiva de técnicas matemáticas para localizar ciudades en la superficie de la Tierra; utiliza métodos trigonométricos (regla de las cuatro cantidades y ley del seno). Fue, en efecto, una preocupación religiosa lo que hizo que los trigonómetras volvieran los ojos a la Tierra. La práctica del Islam obliga al fiel a cumplir cinco compromisos, llamados los Cinco Pilares. La astronomía no sirve de particular ayuda en tres de ellos (profesión de fe, obras de caridad y la *hajj*, o peregrinación a La Meca); pero en los dos restantes —ayuno durante las horas de luz solar en el mes del Ramadán y las cinco plegarias diarias— sí requerían asistencia técnica. Sea el ayuno mensual. El calendario árabe es lunar, de forma que cada mes comienza cuando reaparece el cuarto creciente detrás del Sol.

Si perdemos el creciente de un día particular, podríamos terminar violando las exigencias del ayuno. Las cinco plegarias están reguladas por la posición del Sol en el firmamento. Deben dirigir su mirada hacia la Kaaba, una construcción cúbica que aloja la Piedra Negra; es el destino de la peregrinación que los musulmanes deben realizar una vez en su vida. La dirección de la Kaaba —la *qibla*— cumple otras funciones además de la plegaria diaria. Incluye determinar la dirección en la que los difuntos musulmanes deben quedar expuestos. Para calcular la *qibla* deben conocerse la posición de La Meca y la del orante. Nació así una floreciente industria de creación de tablas de la *qibla* para cualquier localidad. Las mejores fueron las calculadas por Shama al-Din al-Khalili, astrónomo oficial de la mezquita omeya de Damasco.

Mucho antes de que se inventaran los logaritmos o se crearan reglas de cálculo, los cálculos se hacían a mano. Pero incluso en la antigüedad hubo herramientas que facilitaban la tarea. Por ejemplo, la esfera armilar. Se trata de un modelo de esfera celeste que gira en el mismo sentido en que lo hace el firmamento. Para el manejo de la esfera armilar, necesitamos una proyección de la esfera celeste en una superficie plana. Se intentaron varias proyecciones de la esfera. La más común fue la proyección estereográfica. En ella, los círculos de la esfera se transforman en círculos sobre un plano; y conserva los ángulos. Las proyecciones han constituido el corazón de la geometría y de la trigonometría durante siglos.

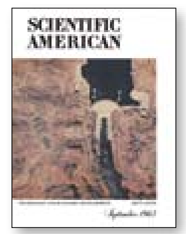
El conjunto más prodigioso de tablas trigonométricas a lo largo del siglo XVI, el *Opus palatinum*, fue compuesto por Georg Rheticus, uno de los primeros defensores del heliocentrismo de Copérnico; su método no difiere sustancialmente del empleado por Ptolomeo. Rheticus murió en 1574, antes de terminar su obra, aunque sí estaban acabadas las tablas, que fueron publicadas en 1596 por Lucius Valentín Otho. Hay tablas de todas las funciones trigonométricas; en su forma modificada, persistieron hasta que fueron sustituidas en 1915.

Hubo otros intentos. Ciento cincuenta años antes de Rheticus, el astrónomo persa Jamshid al-Kashi había considerado el problema del seno 1º de una forma propia. Este maestro del cómputo, calculó el valor de π hasta el equivalente a 14 decimales.

Tardía fue, sin embargo, la introducción de la palabra «trigonometría», etimológicamente «medición de los triángulos». Empezó a emplearla Bartholomaeus Pitiscus, quien en 1600 publicó *Trigonometriae, sive de dimensione triangulorum libri quinque*. Hasta entonces se empleaba la expresión «ciencia de los triángulos». Más allá del término, en el siglo XVII John Napier (1550-1617) le dio un gran impulso con la invención de un procedimiento de extraordinario alcance; el descubrimiento de que los productos de potencias de diez los convertía en suma de exponentes ($10^3 \times 10^4 = 10^7$) constituye el punto de arranque que le condujo a los logaritmos, descritos en su *Mirifici logarithmorum canonis descriptio* (1614). Tras un capítulo introductorio sobre definiciones básicas, el resto de la obra está dedicado a la ciencia de los triángulos en su variedad esférica. Para Pierre Simeon de Laplace el trabajo sobre los logaritmos, al abreviar la tarea, dobló la vida del astrónomo.

—Luis Alonso

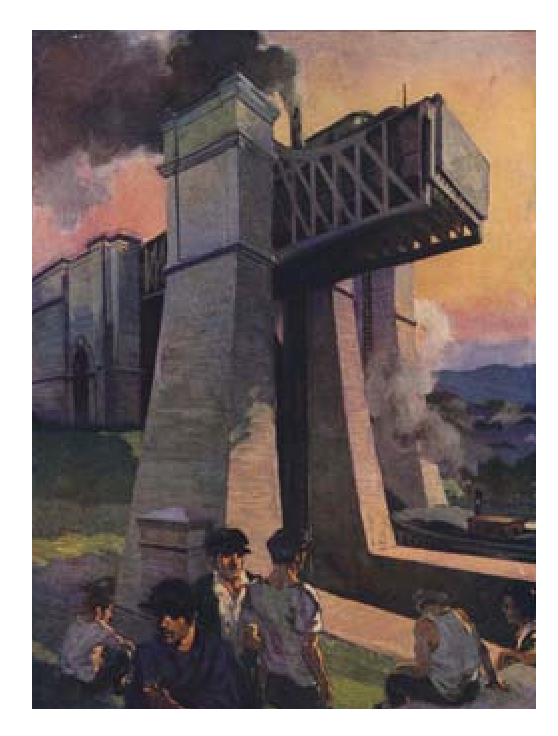
Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Septiembre 1963

Erich Fromm sobre Carl Jung

«Reseña de un libro: *Memories, dreams, reflections*, por Carl G. Jung, Pantheon Books (7,50 dólares).
Desde la infancia, la vida de Jung estuvo dominada por la búsqueda de la certidumbre. ¿Era Dios real? ¿Lo era él mismo? ¿Y la maldad? Acabó en la creencia de haber hallado una respuesta gracias a una idea: que todas sus visiones, sueños y fantasías correspondían a manifestaciones del inconsciente y que él había sido el primero en descubrir esa realidad definitiva, en rendirse a ella con pleno conocimiento y, de ese modo, en dominarla. Su autobiografía resulta esclarecedora e impresionante. Despertaría una profunda compasión, al menos en este lector, a no ser porque Jung combinaba su incapacidad para ver la verdad con un grado tal de oportunismo que, muchas veces, como héroe trágico se asemejaba al Flautista de Hamelín. —Erich Fromm»



ESCLUSA LEVADIZA HIDRÁULICA: Esta imagen aparecía en la cubierta del número del 6 de septiembre de 1913, que ofrecía reportajes sobre diversos canales. La esclusa que se muestra, la de Peterborough en la vía navegable Trent-Severn de Canadá, mueve las barcazas 65 metros verticales arriba y abajo. Hoy sigue en servicio.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CIX, N.º 10, 6 DE SEPTIEMBRE DE 1913



Septiembre 1913

Catástrofes y seguridad

«En el reciente accidente del ferrocarril de New Haven, el pesado convoy, compuesto por una locomotora y su tren, alcanzó y aplastó los dos coches cama de cola del tren que tenía delante, proyectando los pedazos en todas las direcciones junto con los inermes pasajeros. Hubo más de veinte muertos en el acto. Abundan los datos, extraídos del comportamiento de coches de acero en unas condiciones casi tan duras como esas, que demuestran que la estructura metálica habría salvado numerosas vidas, si no la mayoría, de los ocupantes de aquellos dos vagones de cola.»

Pionero de la aeronáutica

«El corresponsal en San Petersburgo del diario deportivo parisino *Aero* telegrafía a su periódico que Igor Sikorsky, estudiante del Instituto Politécnico de San Petersburgo, ha construido tal vez el mayor de los aeroplanos hasta hoy aparecidos. El biplano posee una envergadura de 27 metros. Se dice que el aparato ya hizo un vuelo con siete pasajeros, de 90 kilómetros de distancia y menos de dos horas de duración, a una altitud de 500 metros. Durante el viaje el piloto se turnaba en la timonera con los pasajeros, los cuales podían moverse como si estuvieran en un apartamento ciudadano. Naturalmente, en Francia esos relatos acerca de las prestaciones del aparato son recibidos con una notable incredulidad.»

El Russky Vityaz («Caballero ruso») de 1913 de Sikorsky fue el primer avión cuatrimotor del mundo. Resultó destruido ese mismo año en un accidente inesperado.

Riñón artificial

«El *Times* de Londres ofrece este informe acerca del Congreso Internacional de Medicina: “Una demostración que despertó un gran interés fue la del profesor [John Jacob] Abel, de Baltimore. Este presentó un nuevo e ingenioso método para extraer sustancias del torrente sanguíneo, que sin duda resultará ventajoso para el estudio de algunos de los problemas más complejos. Mediante un tubo de vidrio sujeto a la arteria principal del animal anestesiado, se hace fluir la sangre por un gran número de tubos de celoidina antes de devolverla a las venas a través de un segundo tubo de vidrio. Todas las sustancias difusibles contenidas en la sangre pasan por las capas intermedias de celoidina. De este modo, el profesor Abel ha construido lo que podría considerarse un riñón artificial”.»



Septiembre 1863

Destruir las máquinas

«Si Satán, en su odio por la humanidad, se pusiera a idear la mejor manera de rebajar el valor de los salarios, no podría hallar un plan más efectivo que hacer que las turbas destruyeran las máquinas que ahorran mano de obra. Esta no para de generar riqueza, y la cantidad de ella resulta proporcional a la calidad y a la provisión de los útiles de que disponen los trabajadores para su labor. Solo con sus manos, un hombre ya produce; lo hace más con un hacha y un azadón, más aún con un caballo y un arado, y todavía más con un motor de vapor o una serrería mecánica. Cuando se genera beneficio, este se reparte entre el trabajador que faena y el dueño de los útiles o la maquinaria. El precio de la mano de obra en Inglaterra y Estados Unidos se ha multiplicado varias veces desde la invención de la máquina de vapor, la hiladora y la desmotadora de algodón y el telar mecánico.»



NEUROCIENCIA

Los beneficios del sueño

Giulio Tononi y Chiara Cirelli

Cuando dormimos, se debilitan las conexiones entre nuestras células nerviosas. Al parecer, ello reduce el consumo de energía y, paradójicamente, ayuda a la memoria.



ENTOMOLOGÍA

Insectos necrófagos

Emmanuel Gaudry

Los artrópodos que colonizan un cadáver resultan de gran ayuda para los forenses. El análisis de su desarrollo arroja luz sobre la fecha de la muerte.



FÍSICA CUÁNTICA

¿Qué es real?

Meinard Kuhlmann

Según los físicos, el mundo está hecho de partículas y campos de fuerza. Pero, ¿a qué corresponden, en el fondo, estas entidades?

INFORME ESPECIAL
MATEMÁTICAS DEL PLANETA TIERRA

Introducción
Manuel de León

La Tierra, un planeta de fluidos
Ana María Mancho

Modelos del clima global
Lourdes Tello

Matemáticas de la biodiversidad
Jordi Bascompte

Modelos de propagación de epidemias
Joan Saldaña

Redes sociales y cooperación
Anxo Sánchez

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza,
Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón,
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado,
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR
IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman,
Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER,
MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Barcelona
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14 - 08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

Madrid
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados
es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Adrados: *El amanecer de los exoplanetas*; Luis Bou: *Las TIC van a la escuela*, *Cursos en línea masivos y abiertos*, *Enseñanza adaptativa* y *Foro científico*; Alberto Ramos: *El legado de Évariste Galois*; Sara Arganda: *Ver por primera vez*; Fabio Teixidó: *El futuro del ciclo del hidrógeno*, *Diez cuestiones clave sobre el hielo y la nieve* y *Calentamiento viscoso*; Andrés Martínez: *El duelo en los animales*; J. Vilardell: *Curiosidades de la física* y *Hace...*; Bruno Moreno: *Apuntes*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España